



TUGAS AKHIR - SM141501

**KENDALI SUDUT PADA GERAK KAPAL UNTUK
PELACAKAN LINTASAN DUBINS
MENGUNAKAN METODE DISTURBANCE
COMPENSATING MODEL PREDICTIVE
CONTROL (DC-MPC)**

BAYU ANGGA RIYANTO
NRP 1213 100 069

Dosen Pembimbing:
Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si
Subchan, Ph.D

DEPARTEMEN MATEMATIKA
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

"Halaman ini sengaja dikosongkan."



FINAL PROJECT - SM141501

**STEERING ANGLE SHIP HEADING CONTROL
FOR DUBINS PATH-TRACKING USING
DISTURBANCE COMPENSATING MODEL
PREDICTIVE CONTROL(DC-MPC)**

BAYU ANGGA RIYANTO
NRP 1213 100 069

Supervisor:
Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si
Subchan, Ph.D

DEPARTMENT OF MATHEMATICS
Faculty of Mathematics and Natural Sciences
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

"Halaman ini sengaja dikosongkan."

LEMBAR PENGESAHAN
KENDALI SUDUT PADA GERAK KAPAL UNTUK
PELACAKAN LINTASAN DUBINS
MENGGUNAKAN METODE DISTURBANCE
COMPENSATING MODEL PREDICTIVE
CONTROL (DC-MPC)
STEERING ANGLE SHIP HEADING CONTROL
FOR DUBINS PATH-TRACKING USING
DISTURBANCE COMPENSATING MODEL
PREDICTIVE CONTROL(DC-MPC)

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
Untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
Pada bidang studi Matematika Terapan
Program Studi S-1 Departemen Matematika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

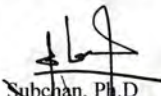
Oleh :

Bayu Angga Riyanto
NRP. 1213 100 069


Menyetujui,

Dosen Pembimbing II

Dosen Pembimbing I


Subchan, Ph.D

NIP. 19710513 199702 4 001


Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si

NIP. 19870728 201404 2 001



Mengetahui,

Ketua Departemen Matematika
FMIPA-ITS


Dr. Hana Mukhlash, S.Si, MT
NIP. 19700821 199403 1 003

Surabaya, 1 Agustus 2017

"Halaman ini sengaja dikosongkan."

KENDALI SUDUT PADA GERAK KAPAL UNTUK PELACAKAN LINTASAN DUBINS MENGUNAKAN METODE DISTURBANCE COMPENSATING MODEL PREDICTIVE CONTROL (DC-MPC)

Nama Mahasiswa : BAYU ANGGA RIYANTO
NRP : 1213 100 069
Jurusan : Matematika FMIPA-ITS
Pembimbing : 1. Tahiyyatul Asfihani, S.Si, M.Si
2. Subchan, Ph.D

Abstrak

Pada penelitian ini dibahas tentang permasalahan kendali sudut pada gerak kapal dengan dua derajat kebebasan, yaitu: sway dan yaw. Kapal membutuhkan kendali yang mampu mengarahkan kapal bergerak menuju tujuan yang diinginkan. Sistem panduan direpresentasikan menggunakan Lintasan Dubins yang akan dikendalikan dengan menggunakan metode Disturbance Compensating Model Predictive Control (DC-MPC). Tujuan pengendalian tersebut adalah menjaga pergerakan kapal yang direpresentasikan oleh model dinamik sehingga kapal bergerak sesuai dengan sistem panduan yang diberikan pada kondisi laut yang bergelombang. Model dinamik manuver kapal yang digunakan adalah model dinamik kapal Davidson Schiff. Metode DC-MPC merupakan pengembangan dari Model Predictive Control (MPC) berbasis pada kontrol umpan balik (feedback control). Metode ini merupakan salah satu alternatif penyelesaian desain kendali lanjutan agar kendali tangguh terhadap gangguan yang diberikan secara langsung. Pada metode ini, dilakukan pendefinisian gangguan yang diberikan pada sistem terlebih dahulu. Kemudian dilakukan optimasi pada sistem sehingga mendapatkan disturbance compensating

(kompensasi gangguan). Selanjutnya dilakukan simulasi menggunakan software MATLAB dengan pengaruh jenis lintasan dan pengaruh besar horizon prediksi terhadap hasil kendali didapat bahwa metode DC-MPC dapat diterapkan dengan baik sehingga menghasilkan nilai sudut gerak kapal dan error yang kecil dari selisih antara reference trajectory dan prediksi output.

Kata-kunci: *DC-MPC, kendali sudut gerak kapal, Lintasan Dubins, gangguan gelombang laut*

STEERING ANGLE SHIP HEADING CONTROL FOR DUBINS PATH-TRACKING USING DISTURBANCE COMPENSATING MODEL PREDICTIVE CONTROL(DC-MPC)

Name : BAYU ANGGA RIYANTO
NRP : 1213 100 069
Department : Mathematics FMIPA-ITS
Supervisors : 1. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si
2. Subchan, Ph.D

Abstract

In this study discussed the problem of motion angle control with two degrees of freedom, namely: sway and yaw. The vessel requires control that is capable of steering the ship moving toward its intended destination. The guidance system is represented using the Dubins Track to be controlled using the Disturbance Compensating Model Predictive Control (DC-MPC) method. The purpose of such control is to maintain the movement of the vessel that is represented by the dynamic model so that the ship moves according to the guidance system that is given to the surging sea conditions. Dynamic model of ship maneuver used is dynamic ship model Davidson Schiff. The DC-MPC method is the development of the Predictive Control Model (MPC) based on feedback control. This method is one of the alternatives to the completion of the advanced control design to overcome the interference provided directly. In this method, the definition of disturbance is given to the system first. Then the optimization is done on the system so get disturbance compensating compensation interference. Furthermore, simulation using MATLAB software with the influence of the type of trajectory and the influence of the prediction horizon on the control result obtained that the DC-MPC method can be applied well to produce the angle of motion

of the ship and the small error of the difference between the reference trajectory and the output.

Keywords: *DC-MPC, Steering Angle Ship Heading Control, Dubins-path, Sea wave distrubance*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhaanahu Wa Ta'aala yang telah memberikan limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang berjudul

**”KENDALI SUDUT PADA GERAK KAPAL
UNTUK PELACAKAN LINTASAN DUBINS
MENGUNAKAN METODE DISTURBANCE
COMPENSATING MODEL PREDICTIVE
CONTROL(DC-MPC)”**

sebagai salah satu syarat kelulusan Program Sarjana Jurusan Matematika FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan kepada:

1. Bapak Dr. Imam Mukhlash, MT selaku Ketua Jurusan Matematika ITS.
2. Ibu Tahiyyatul Asfihani, S.Si, M.Si dan Bapak Subchan, Ph.D selaku dosen pembimbing atas segala bimbingan dan motivasinya kepada penulis dalam mengerjakan tugas akhir ini sehingga dapat terselesaikan dengan baik.
3. Ibu Dr. Dra. Mardijah MT, Bapak Drs. Suhud Wahyudi, M.Si, dan Bapak Dr. Hariyanto, M.Si selaku dosen penguji yang telah memberikan semua saran demi perbaikan tugas akhir ini.

4. Bapak Drs. Iis Herisman, M.Si selaku koordinator tugas akhir dan Mas Ali yang selalu memberikan informasi mengenai tugas akhir.
5. Ibu Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si selaku dosen wali yang telah memberikan arahan akademik selama penulis menempuh pendidikan di Jurusan Matematika FMIPA ITS.
6. Bapak dan Ibu dosen serta para staf Jurusan Matematika ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.
7. Teman-teman Matematika ITS angkatan 2013 dan Laskar Matematika ITS 2013 yang selalu mendoakan dan mendukung penulis.
8. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu-persatu. Terimakasih telah mendoakan dan mendukung penulis sampai dengan selesainya program ini.

Penulis juga menyadari bahwa dalam tugas akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh sebab itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan tugas akhir ini. Akhir kata, penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat membawa manfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
DAFTAR SIMBOL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan	5
1.5 Manfaat	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Penelitian Terdahulu	7
2.2 Model matematika dinamika kapal	8
2.3 <i>Lintasan Dubins</i>	15
2.3.1 Lintasan RSR	18
2.3.2 Lintasan LSL	21
2.3.3 Lintasan RSL	21

2.3.4	Lintasan LSR	23
2.4	Keterkontrolan dan Keteramatan	24
2.5	Gangguan Lingkungan pada Kapal	25
2.6	Model Predictive Control (MPC)	25
2.7	Disturbance Compensating Model Predictive Control (DC -MPC)	29
BAB III	METODE PENELITIAN	33
3.1	Studi literatur	33
3.2	Penentuan Lintasan	33
3.3	Membentuk Model Kapal	33
3.4	Desain Kendali menggunakan DC-MPC	33
3.5	Simulasi numerik dan analisis penerapan metode DC-MPC	34
3.6	Penarikan Kesimpulan dan Saran	34
3.7	Penulisan Laporan Tugas Akhir	34
BAB IV	ANALISIS DAN PEMBAHASAN	37
4.1	Penentuan Lintasan	37
4.2	Desain Kendali dengan Menggunakan DC- MPC	40
4.2.1	Kajian Model	40
4.2.2	Uji Keterkontrolan dan Keteramatan ..	43
4.2.3	Diskritisasi Model	45
4.2.4	Desain Kendali	46
4.3	Hasil Simulasi	59
BAB V	PENUTUP	75
5.1	Kesimpulan	75
5.2	Saran	75
DAFTAR PUSTAKA		77
LAMPIRAN		79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Enam derajat kebebasan kapal[3]	9
Gambar 2.2	Lintasan Dubins CLC dan CCC	15
Gambar 2.3	Lintasan Dubins dengan garis singgung luar (kiri) dan dalam (kanan)	16
Gambar 2.4	Arah Pembentukan Busur Lingkaran ..	16
Gambar 2.5	Strategi MPC[9]	26
Gambar 2.6	Struktur dasar MPC[9]	26
Gambar 3.1	Algoritma Perencanaan Lintasan Dubins	35
Gambar 3.2	Diagram Alur Penelitian	36
Gambar 4.1	Lintasan Dubins jenis RSL	39
Gambar 4.2	Perbesaran Gambar Lintasan Dubins pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan) Lintasan	39
Gambar 4.3	Lintasan Dubins jenis RSR	60
Gambar 4.4	Perbesaran Gambar Lintasan Dubins pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan) Lintasan	60
Gambar 4.5	Hasil kendali sudut kemudi kapal pada Lintasan Dubins RSR	61
Gambar 4.6	Hasil Selisih antara Reference dan sudut hadap kapal	62
Gambar 4.7	Lintasan Dubins jenis RSL	63
Gambar 4.8	Perbesaran Gambar Lintasan Dubins pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan) Lintasan	64

Gambar 4.9 Hasil kendali sudut kemudi kapal pada Lintasan Dubins RSL	64
Gambar 4.10 Hasil Selisih antara Reference dan sudut hadap kapal	65
Gambar 4.11 Lintasan Dubins jenis LSR	66
Gambar 4.12 Perbesaran Gambar Lintasan Dubins pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan) Lintasan	67
Gambar 4.13 Hasil kendali sudut kemudi kapal pada Lintasan Dubins RSL	68
Gambar 4.14 Hasil Selisih antara Reference dan sudut hadap kapal	68
Gambar 4.15 Lintasan Dubins jenis LSL	70
Gambar 4.16 Perbesaran Gambar Lintasan Dubins pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan) Lintasan	70
Gambar 4.17 Hasil kendali sudut kemudi kapal pada Lintasan Dubins RSL	71
Gambar 4.18 Hasil Selisih antara Reference dan sudut hadap kapal	72

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Notasi pada dinamika kapal[3]	9
Tabel 4.1	Tabel Panjang lintasan Dubins	38
Tabel 4.2	Tabel Data Kapal Perang Corvet Kelas Sigma [11]	40
Tabel 4.3	Tabel Panjang lintasan Dubins	59
Tabel 4.4	Tabel Panjang lintasan Dubins	63
Tabel 4.5	Tabel Panjang lintasan Dubins	66
Tabel 4.6	Tabel Panjang lintasan Dubins	69
Tabel 4.7	Tabel RMSE	73

"Halaman ini sengaja dikosongkan."

DAFTAR LAMPIRAN

	Hal
LAMPIRAN A Biodata Penulis	80

"Halaman ini sengaja dikosongkan."

Daftar Simbol

Ψ	Sudut <i>yaw</i>
δ_R	Defleksi <i>rudder</i>
x	Variabel keadaan
y	Keluaran sistem
r	Kecepatan Sudut <i>yaw</i>
I_z	Momen Inersia pada sumbu Z
C_B	Koefisien blok
x_g	x <i>coordinate of CG</i>
A_δ	Luas <i>rudder</i>
m	Massa kapal
u_0	Kecepatan jelajah kapal
$Y_{\dot{v}}$	Turunan gaya hidrodinamika sway terhadap \dot{v}
$Y_{\dot{r}}$	Turunan gaya hidrodinamika sway terhadap $Y_{\dot{r}}$
$N_{\dot{r}}$	Turunan momen yaw terhadap \dot{r}
Y_v	Turunan gaya arah sway terhadap v
Y_r	Turunan gaya arah yaw terhadap r
N_v	Turunan momen sway terhadap v
$N_{\dot{v}}$	Turunan momen sway terhadap \dot{v}
N_r	Turunan momen yaw terhadap r
Y_δ	Turunan gaya sway terhadap sudut rudder
N_δ	Turunan momen sway terhadap sudut rudder
u	Input sistem
ρ	Massa jenis air laut
L	Panjang kapal
T	Kedalaman atau tinggi kapal
B	Lebar kapal

"Halaman ini sengaja dikosongkan."

BAB I

PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai hal-hal yang menjadi latar belakang munculnya permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini. Permasalahan-permasalahan tersebut disusun ke dalam suatu rumusan masalah. Selanjutnya dijabarkan juga batasan masalah untuk mendapatkan tujuan yang diinginkan serta manfaat yang dapat diperoleh dari Tugas Akhir ini.

1.1 Latar Belakang

Setiap negara mempunyai wilayah dan kondisi geografis yang menjadi faktor penting dalam menentukan strategi pertahanan dan keamanan. Di beberapa negara ada wilayah yang tidak memiliki laut, ada pula negara yang dikelilingi oleh laut ataupun yang berbatasan dengan laut. Indonesia adalah negara kepulauan terbesar di dunia yang terhimpit diantara dua samudra dan dua benua dengan luas total $1,904,569 \text{ km}^2$ yang memiliki komposisi luas daratan $1,811,569 \text{ km}^2$ dan luas perairan $93,000 \text{ km}^2$ [1]. Dengan daerah seluas itu dan kondisi geografis pulau yang terpisah-pisah dengan laut, tentunya kedaulatan Indonesia terutama kedaulatan atas wilayah perairan menjadi sangat rentan terhadap ancaman-ancaman dari luar. Sehingga diperlukan adanya sistem pertahanan keamanan kuat untuk menjaga keutuhan wilayah perairan. Dalam hal ini, kapal merupakan salah satu pilihan tepat untuk transportasi industri ataupun patroli di wilayah laut.

Mengingat wilayah laut rentan terhadap berbagai gangguan lingkungan untuk itu dibutuhkan pengendalian

terhadap gerak kapal agar dapat menjaga kestabilan di lautan. Ketika melakukan manuver di lautan, sebuah kapal mempunyai enam derajat kebebasan[2]. Pergerakan ini berpusat pada tiga sumbu utama, antara lain: sumbu longitudinal (dari buritan ke depan), sumbu transversal (samping), dan sumbu normal bumi (atas ke bawah). Pada masing-masing sumbu ini terdapat gerakan rotasi serta translasi. Gerakan pada sumbu longitudinal adalah surge sebagai translasi dan roll sebagai rotasi. Sedangkan pada sumbu transversal adalah sway (translasi) dan pitch (rotasi). Heave dan pitch masing-masing sebagai translasi dan rotasi pada sumbu normal bumi[3]. Umumnya, sistem gerak kapal yang digunakan adalah tiga derajat kebebasan yaitu surge, yaw, dan sway. Pada saat kecepatan surge, sway, dan yaw tak terkendali, dapat menghasilkan gerakan lain seperti pitch, heave, dan roll yang dapat menyebabkan guncangan keras dan kerusakan kargo pada kapal[4].

Oleh karena itu di perlukan panduan dan kendali yang mampu mengarahkan kapal bergerak menuju tujuan yang diinginkan. Sistem navigasi biasanya dibantu dengan Global Positioning System (GPS) yang memberikan letak di permukaan bumi dengan bantuan penyalarsan sinyal satelit. Sistem ini memiliki tujuan untuk menemukan lintasan dari posisi awal ke posisi akhir kapal. Setelah navigasi selesai, sistem selanjutnya adalah sistem panduan. Panduan merupakan proses perencanaan lintasan yang menghasilkan trayektori yang harus diikuti berdasarkan data posisi awal dan posisi akhir hasil navigasi. Perencanaan lintasan dapat diperoleh melalui beberapa metode salah satunya lintasan Dubins. Lintasan Dubins adalah lintasan optimal yang memenuhi kelengkungan maksimum terikat antara dua titik dengan orientasi tertentu dalam sebuah bidang baik jalur CLC(Circle-Line-Circle) atau CCC(Circle-Circle-Circle), atau

bagian dari keduanya, di mana C merupakan busur lingkaran dan L merupakan garis lurus yang bersinggungan dengan C [5]. Lintasan Dubins memiliki beberapa kelebihan diantaranya yaitu perencanaan lintasan menggunakan metode ini dapat dinamis untuk semua sudut di semua kuadran baik di titik awal maupun di titik akhir dan lintasan Dubins lebih optimal terhadap waktu karena dapat membangkitkan kelengkungan lintasan[6]. Selain itu, lintasan Dubins tidak membutuhkan banyak waktu dalam perencanaannya sehingga lebih optimal dan efisien serta membutuhkan waktu yang sedikit untuk mencapai target[7]. Oleh karena itu, perencanaan lintasan dilakukan menggunakan lintasan Dubins.

Kemudian untuk metode pengendali yang digunakan adalah Disturbance Compensating Model Predictive Control (DC-MPC). DC-MPC merupakan pengembangan dari MPC Model Predictive Control, berbasis pada kontrol umpan balik (*feedback control*). Metode ini merupakan salah satu alternatif penyelesaian desain kendali lanjutan untuk mengatasi gangguan yang diberikan secara langsung. Pada metode ini, dilakukan pendefinisian gangguan yang diberikan pada sistem terlebih dahulu dengan nilai gangguan yang terukur. Kemudian dilakukan optimasi pada sistem sehingga mendapatkan disturbance compensating (kompensasi gangguan). Proses inilah yang membedakan dari MPC pada umumnya, kompensasi gangguan yang diperoleh selanjutnya dijadikan input pada algoritma MPC. Ide pengembangan metode DC-MPC diperkenalkan oleh Li dan Sun (2012) dalam penelitiannya mengenai (*ship heading control*). Pada penelitian tersebut dilakukan perbandingan dengan metode-metode MPC yang telah ada sebelumnya. Hasilnya, DC-MPC dapat mengatasi masalah gangguan lingkungan sehingga gerakan kapal dapat dikendalikan sesuai kendala yang ditetapkan[4]. Sedangkan Model yang digunakan dalam

penelitian ini mempertimbangkan dua derajat kebebasan, yaitu yaw dan sway. Diasumsikan bahwa surge, roll, pitch dan heave tidak mempengaruhi manuver kapal.

Ruang lingkup penelitian ini dikembangkan pada sistem kendali gerakan kapal dengan dua derajat kebebasan. Selanjutnya di lakukan pelacakan lintasan Dubins menggunakan metode DC-MPC. Gangguan yang digunakan adalah gelombang laut. Berdasarkan uraian diatas, maka pada penelitian ini akan membahas mengenai pengendalian sudut kemudi kapal agar bergerak sesuai dengan lintasan yang diinginkan terutama lintasan yang tidak lurus. Penelitian ini akan dikembangkan pada lintasan yang ditentukan dengan menerapkan metode DC-MPC. Selanjutnya dilakukan simulasi dan analisis untuk mendapatkan keakuratan metode yang akan diterapkan pada model kendali gerak Kapal Perang Corvet Kelas Sigma.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disajikan, rumusan masalah yang akan diselesaikan pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana kendali sudut pada gerak kapal(*ship heading control*) untuk pelacakan lintasan Dubins menggunakan metode DC-MPC ?
2. Bagaimana hasil simulasi kendali sudut pada gerak kapal(*ship heading control*) untuk pelacakan lintasan Dubins menggunakan metode DC-MPC ?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam proposal tugas akhir ini adalah :

1. Model matematika manuver kapal membentuk sistem persamaan dengan mempertimbangkan dua derajat kebebasan.

2. Gangguan yang diperhitungkan adalah gangguan gelombang laut.
3. Kapal yang digunakan pada simulasi adalah Kapal Perang Corvet Kelas Sigma.
4. *Software* yang digunakan untuk simulasi adalah MATLAB.

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Untuk mengetahui bagaimana kendali sudut pada gerak kapal (*ship heading control*) untuk pelacakan lintasan Dubins menggunakan metode DC-MPC.
2. Mensimulasikan serta menganalisis penerapan metode DC-MPC pada sistem kendali sudut pada gerak kapal (*ship heading control*) untuk pelacakan lintasan Dubins.

1.5 Manfaat

Dari penelitian Tugas Akhir ini, penulis mengharapkan agar Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi berbagai kalangan sebagai berikut :

1. Memberikan metode alternatif yang lebih baik pada kendali gerak kapal dengan menggunakan metode DC-MPC.
2. Sebagai dasar pengembangan penelitian terkait dibidang desain kendali kapal di lautan.

"Halaman ini sengaja dikosongkan."

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini diuraikan mengenai hasil dari penelitian-penelitian sebelumnya yang terkait dengan permasalahan Tugas Akhir ini. Selain itu juga diuraikan dasar teori yang menunjang dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam Tugas Akhir ini penulis melihat dari beberapa penelitian-penelitian sebelumnya yang sesuai dengan topik yang diambil. Salah satu penelitian yang digunakan adalah jurnal yang ditulis oleh LI dan Sun tahun 2012 dengan judul *Disturbance Compensating Model Predictive Control With Application to Ship Heading Control*. Pada penelitian tersebut dijelaskan tentang algoritma DC-MPC yang kinerjanya dibandingkan dengan metode-metode MPC yang telah ada sebelumnya. Hasilnya, DC-MPC dapat mengatasi masalah gangguan lingkungan sehingga gerakan kapal dapat dikendalikan sesuai kendala yang ditetapkan[4].

Penelitian juga dilakukan oleh Sari Cahyaningtias pada tahun 2014 yang berjudul *Penerapan Disturbance Compensating Model Predictive Control (DC-MPC) Pada Kendali Gerak Kapal*. Pada penelitian ini dibahas permasalahan pengendalian manuver kapal. Pengendalian sistem gerak kapal dilakukan dengan metode *Disturbance Compensating Model Predictive Control (DC-MPC)*. Metode DC-MPC diterapkan dengan membentuk kompensasi kendali dan dilakukan optimasi dengan mempertimbangan gangguan yang ada[8].

Selain itu, pada penelitian lain yang berjudul "Perencanaan Lintasan Dubins-Geometri pada Kapal Tanpa Awak untuk Menghindari Halangan Statis" oleh Nur Mu'alifah, Iis Herisman dan Subchan pada tahun 2013 mengadopsi metode Dubins-Geometri untuk merancang lintasan pelayaran kapal tanpa awak dengan halangan statis. Penelitian tersebut memberikan hasil beberapa contoh simulasi lintasan Dubins meliputi lintasan RSR, LSL, RSL, dan LSR yang berhasil menghindari halangan statis[6]. Pada penelitian tersebut diperoleh kesimpulan bahwa lintasan Dubins-Geometri merupakan lintasan yang dinamis untuk semua sudut di sebarang kuadran yang memberikan kemudahan dalam perencanaannya, dan lintasan Dubins - Geometri tidak membutuhkan banyak waktu dalam proses perencanaan sehingga lebih efisien dan optimal.

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh Dian Kusuma Rahma Putri pada tahun 2016 yang berjudul Kendali Sudut Kemudi pada mobil untuk Pelacakan Lintasan Dubins dengan menggunakan Model Predictive Control. Pada penelitian tersebut dijelaskan tentang sistem panduan direpresentasikan menggunakan Lintasan Dubins yang akan dikendalikan dengan menggunakan Model Predictive Control[9]. Tujuan pengendalian tersebut adalah menjaga pergerakan mobil yang direpresentasikan dengan model dinamik gerak lateral sehingga mobil bergerak sesuai dengan sistem panduan yang diberikan.

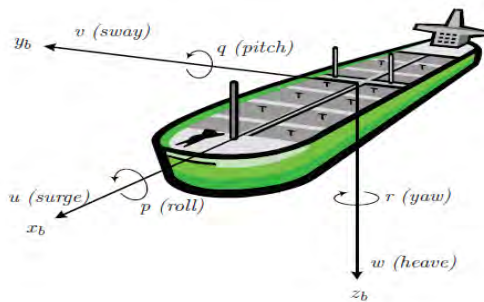
2.2 Model matematika dinamika kapal

Pada model dinamika kapal dirumuskan sebagai suatu rigid body dengan enam derajat kebebasan. Kapal mempunyai tiga sumbu utama diantaranya yaitu sumbu longitudinal (membujur), sumbu lateral (menyamping), dan sumbu vertikal. Pada prinsipnya dinamika gerak kapal dibagi dalam enam derajat kebebasan, yaitu: surge, sway,

yaw, heave, roll, dan pitch. Secara umum gerakan yang dialami sebuah kapal ketika melaju di lautan ada dua macam, yaitu gerakan translasi dan rotasi. Gerakan translasi terdiri dari surge (maju/mundur), sway (kanan/kiri), heave (atas/bawah). Gerak rotasi kapal dibagi menjadi tiga, yaitu roll (gerakan maju), pitch (gerakan memutar ke depan), yaw (gerakan memutar ke samping). Derajat kebebasan ini juga biasanya disebut sebagai komponen gerak dari kapal dengan enam komponen gerak dapat dilihat pada tabel 2.1 dan gambar 2.1 dibawah ini: .

Tabel 2.1: Notasi pada dinamika kapal[3]

DOF	Gerakan	Gaya dan momen	Kecepatan linear dan angular	Posisi dan Sudut Euler
1	Gerak arah-x(surge)	X	U	X
2	Gerak arah-y sway)	Y	V	Y
3	Gerak arah-z(heave)	Z	W	Z
4	Rotasi arah-x(roll)	K	P	Φ
5	Rotasi arah-y(pitch)	M	Q	Θ
6	Rotasi arah-z(yaw)	N	R	ψ



Gambar 2.1: Enam derajat kebebasan kapal[3]

Persamaan dinamika kapal untuk 6 derajat kebebasan (DOF) dapat dituliskan sebagai berikut[2]:

$$\begin{cases} m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] = Y \\ m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] = Z \\ I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] = K \\ I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = M \\ I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = N \end{cases} \quad (2.1)$$

Persamaan kecepatan dan sistem kemudi kapal yang diamati akan sesuai berdasarkan beberapa asumsi, yaitu:

1. Distribusi massa homogen dan bidang xz simetris ($I_{xy} = I_{yz} = 0$).
2. Koordinat asal diletakan di tengah kapal ($y_G = 0$).
3. Mode heave, roll dan pitch diabaikan ($w = p = q = \dot{w} = \dot{p} = \dot{q} = 0$). Berdasarkan asumsi tersebut persamaan (2.1) menjadi:

$$\begin{cases} \text{surge} : m(\dot{u} - vr - x_G r^2) = X \\ \text{sway} : m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) = Y \\ \text{yaw} : I_z \dot{r} + m x_G (v + ur) = N \end{cases} \quad (2.2)$$

4. kecepatan sway v , kecepatan yaw r dan sudut rudder δ kecil.

Hal ini mengimplikasikan bahwa mode surge dapat dipisahkan dari mode sway dan yaw dengan asumsi kecepatan u_0 adalah konstan untuk gaya dorong yang konstan. Dengan cara yang sama, diasumsikan pada sway dan yaw $v_0 = r_0 = 0$. Oleh sebab itu,

$$\begin{aligned} u &= u_0 + \Delta u; v = \Delta v; r = \Delta r \\ X &= X_0 + \Delta X; Y = \Delta Y; N = \Delta N \end{aligned}$$

dimana Δu , Δv , Δr adalah gangguan kecil dari nilai nominal u_0 , v_0 dan r_0 , dan ΔX , ΔY , ΔN adalah gangguan kecil dari nilai nominal X_0 , Y_0 dan N_0 , sehingga persamaan (2.2) dapat ditulis menjadi:

$$\begin{cases} m\Delta\dot{u} = X_0 + \Delta X \\ m(\Delta\dot{v} + u_0\Delta r + x_G\Delta\dot{r}) = \Delta Y \\ I_z\Delta\dot{r} + mx_G(\Delta\dot{v} + u_0\Delta r) = \Delta N \end{cases} \quad (2.3)$$

dengan catatan bahwa persamaan sistem kemudi kapal telah terpisah dari persamaan kecepatan, dengan menggunakan persamaan (2.2) persamaan (2.3) menjadi:

$$\begin{cases} m\dot{u} = X \\ m(\dot{v} + u_0r + x_G\dot{r}) = Y \\ I_z\dot{r} + mx_G(\dot{v} + u_0r) = N \end{cases} \quad (2.4)$$

Persamaan kendali pada gerak kapal biasanya memuat variabel keadaan v , r , ψ dan kontrol masukan δ . Berdasarkan persamaan (2.4) persamaan kendali dinamika kapal adalah:

$$\begin{aligned} m(\dot{v} + u_0r + x_G\dot{r}) &= Y \\ I_z\dot{r} + mx_G(\dot{v} + u_0r) &= N \end{aligned}$$

teori linier Davidson dan Schiff (1946) menjelaskan bahwa gaya dan momen hidrodinamika dapat dimodelkan sebagai:

$$\begin{aligned} Y &= Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_vv + Y_rr + Y_{\delta}\delta_R \\ N &= N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_vv + N_rr + N_{\delta}\delta_R \end{aligned}$$

dimana $Y_{\dot{v}}$ adalah turunan gaya arah sway terhadap \dot{v} , $Y_{\dot{r}}$ adalah turunan gaya sway terhadap \dot{r} , $N_{\dot{r}}$ adalah turunan momen yaw terhadap \dot{r} , Y_v adalah turunan gaya arah sway terhadap v , Y_r adalah turunan gaya arah yaw terhadap r , N_v adalah turunan momen sway terhadap v , $N_{\dot{v}}$ adalah

turunan momen sway terhadap \dot{v} , N_r adalah turunan momen yaw terhadap r , Y_δ dan N_δ adalah turunan gaya dan momen sway terhadap sudut rudder[2].

Sehingga dengan pendekatan Davidson dan Schiff, bentuk umum persamaan model dinamik kapal dengan 2 derajat kebebasan dinyatakan dalam bentuk:

$$M\dot{v} + N(u_0)v = b\delta_R \quad (2.5)$$

Dimana $\dot{v} = [v, r]^T$ adalah vektor keadaan, δ_R adalah sudut rudder dan:

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_g - Y_{\dot{r}} \\ mx_g - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \\ N(u_0) &= \begin{bmatrix} -Y_v & mu_0 - Y_r \\ -N_v & mx_g u_0 - N_r \end{bmatrix} \\ b &= \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix} \end{aligned}$$

dengan matriks $N(u_0)$ adalah penjumlahan gaya redaman linier dan gaya Coriolis dan sentripetal $C(u_0)$ (dengan syarat penambahan mu_0 dan $mx_g u_0$)

$$N(u_0) = C(u_0) + D$$

Dan juga perhatikan bahwa kita harus memilih matrik inersia $M \neq M^T$. Model ruang keadaan yang bersesuaian didapatkan dengan memilih $x = [v, r]^T$ sebagai vektor keadaan dan $u = \delta_R$ Sehingga

$$\dot{x} = Ax + b_1 u$$

Dengan

$$A = -M^{-1}N = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

$$b_1 = M^{-1}b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

Dan

$$a_{11} = \frac{(I_z - N_r)Y_v - (mx_g - Y_{\dot{r}})N_v}{\det(M)}$$

$$a_{12} = \frac{(I_z - N_r)(Y_v - mu_0) - (mx_g - Y_{\dot{r}})(N_r - mx_g u_0)}{\det(M)}$$

$$a_{21} = \frac{(m - Y_v)N_v - (mx_g - Y_v)N_v}{\det(M)}$$

$$a_{22} = \frac{(m - Y_v)(N_r - mx_g u_0) - (mx_g - N_v)(Y_r - mu_0)}{\det(M)}$$

$$b_1 = \frac{(I_z - N_r)Y_{\delta} - (mx_g - Y_{\dot{r}})N_{\delta}}{\det(M)}$$

$$b_2 = \frac{(m - Y_v)N_{\delta} - (mx_g - N_v)Y_{\delta}}{\det(M)}$$

Selanjutnya dengan menggunakan pendekatan *slender body strip* turunan koefisien hidrodinamika yang telah dikembangkan oleh Smitt (1970), Norrbin (1971) dan Inoue (1981) dan dikemukakan oleh Clarke (1982) ditunjukkan dalam bentuk persamaan (2.6-2.15). Koefisien hidrodinamika pada persamaan (2.6-2.15) merupakan bentuk non dimensional yang diturunkan dengan sistem prime I. Untuk memperoleh besaran gaya dikalikan dengan $\frac{1}{2}\rho U^2 L^2$ momen dikalikan dengan $\frac{1}{2}\rho U^2 L^3$, besaran massa dikalikan

dengan $\frac{1}{2}\rho L^3$, besaran momen inersia dikalikan dengan $\frac{1}{2}\rho L^5$. Dimana ρ = massa jenis air laut (1025 kg/m^3), L = Lenght between perpendicular = panjang kapal, U = kecepatan servis kapal, B = lebar kapal, T = kedalaman/tinggi kapal, C_B = koefisien blok. Sehingga diperoleh:

$$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0,16 \frac{C_B B}{T} - 5,1 \left(\frac{B}{L}\right)^2 \quad (2.6)$$

$$\frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} = 0,6 \left(\frac{B}{L}\right) - 0,0033 \left(\frac{B}{L}\right)^2 \quad (2.7)$$

$$\frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2} = 1,1 \left(\frac{B}{L}\right) - 0,041 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.8)$$

$$\frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{2} + 0,017 \frac{C_B B}{T} - 0,33 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.9)$$

$$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0,4 \frac{C_B B}{T} \quad (2.10)$$

$$\frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{2} + 2,2 \left(\frac{B}{L}\right) - 0,08 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.11)$$

$$\frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{2} + 2,4 \left(\frac{T}{L}\right) \quad (2.12)$$

$$\frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{4} + 0,039 \frac{B}{L} - 0,56 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.13)$$

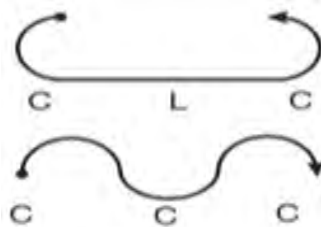
Sedangkan untuk gaya dan momen yang diakibatkan rudder,

$$Y'_\delta = \rho \frac{\pi}{4} \frac{A_\delta}{LT} \quad (2.14)$$

$$N'_\delta = -\frac{1}{2} Y'_\delta \quad (2.15)$$

2.3 *Lintasan Dubins*

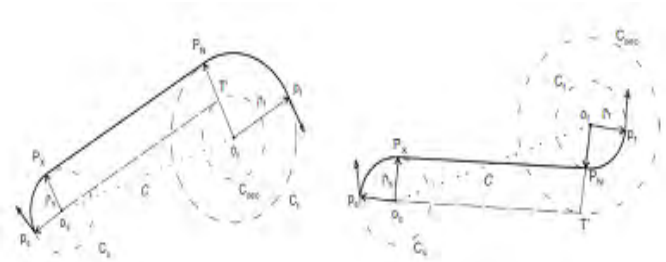
Lintasan Dubins adalah lintasan terpendek yang menghubungkan dua titik yang telah dibuktikan secara matematis oleh Lester Eli Dubins pada 1957. Definisi sederhana dari lintasan Dubins yaitu lintasan sesingkat mungkin yang memenuhi kelengkungan maksimum terikat antara dua titik dengan orientasi tertentu dalam sebuah bidang baik jalur CLC atau CCC, atau bagian dari keduanya, di mana C merupakan busur lingkaran dan L merupakan garis lurus yang bersinggungan dengan C[3]. Lintasan CLC dibentuk dengan menghubungkan dua busur lingkaran dengan sebuah garis yang menyinggung keduanya sedangkan lintasan CCC dibentuk dengan tiga busur lingkaran yang berurutan dan saling bersinggungan seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2: Lintasan Dubins CLC dan CCC

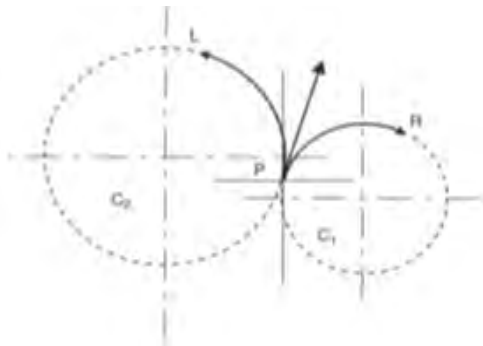
Lintasan Dubins diilustrasikan pada Gambar 2.3 dengan garis hitam menyatakan lintasan, Ps menyatakan posisi awal dan Pf menyatakan posisi akhir.

Pada Gambar 2.3 dapat dilihat bahwa arah garis dari P_x ke P_n sama dengan garis singgung dari dua lingkaran pada titik P_x dan P_n . P_x merupakan titik akhir dari busur lingkaran pertama dan P_n merupakan titik awal dari busur lingkaran kedua.



Gambar 2.3: Lintasan Dubins dengan garis singgung luar (kiri) dan dalam (kanan)

Bentuk Lintasan Dubins juga dipengaruhi oleh pergerakan kapal. Terdapat dua jenis pergerakan yang mungkin terjadi saat membentuk busur lingkaran yaitu kapal berbelok ke kiri berlawanan arah jarum jam (L) dan berbelok ke kanan searah jarum jam (R) sesuai pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4: Arah Pembentukan Busur Lingkaran

Kemungkinan lintasan geometri Dubins yang terbentuk ada empat macam lintasan yaitu *Right-Straight-Right* (RSR),

Left-Straight-Left (LSL), *Right-Straight-Left* (RSL) dan *Left-Straight-Right* (LSR) [3]. Perancangan lintasan Dubins membutuhkan parameter input berikut ini:

1. Posisi awal $Ps(xs; ys; \psi_s)$
2. Posisi akhir $Pf(sf; yf; \psi_f)$
3. Jari-jari kelengkungan awal ρ_s
4. Jari-jari kelengkungan akhir ρ_f

Adapun proses menghitung lintasan Dubins sebagai berikut:

1. Menentukan parameter input posisi awal dan akhir kapal
2. Menentukan koordinat titik pusat lingkaran awal $O_s(x_{cs}, y_{cs})$ dan lingkaran akhir $O_f(x_{cf}, y_{cf})$ menggunakan

$$(x_{cs}, y_{cs}) = (x_s - \rho_s \cos(\psi_s \pm \frac{\pi}{2}), y_s - \rho_s \sin(\psi_s \pm \frac{\pi}{2}))$$

$$(x_{cf}, y_{cf}) = (x_f - \rho_f \cos(\psi_f \pm \frac{\pi}{2}), y_f - \rho_f \sin(\psi_f \pm \frac{\pi}{2}))$$

3. Garis c yang menghubungkan antara titik pusat O_s dan O_f disebut garis pusat. Panjang garis pusat diperoleh dari

$$\|c\| = \sqrt{(x_{cs} - x_{cf})^2 + (y_{cs} - y_{cf})^2}$$

4. Menentukan posisi koordinat tangent entry $P_N(xP_N; yP_N)$ dan tangent exit $P_x(xP_x; yP_x)$. Tangent entry adalah titik dari akhir lintasan garis dan awal dari busur lingkaran kedua yang akan dibentuk, sedangkan tangent exit adalah titik keluar dari lintasan busur lingkaran dan awal dari lintasan garis. Sebelum menentukan kooordinat tersebut perlu dilakukan perhitungan sudut entry θ_{en} dan sudut exit θ_{ex}

5. Berdasarkan nilai-nilai parameter yang diperoleh di atas, panjang lintasan Dubins dapat dihitung sebagai:

$$L_{Dubins} = L_{arc,start} + L_{garissinggung} + L_{arc,finish}$$

$$L_{Dubins} = f(\rho_s, \rho_f)$$

Proses perhitungan panjang masing-masing lintasan Dubins diberikan sebagai berikut:

2.3.1 Lintasan RSR

Lintasan RSR adalah lintasan yang terbentuk sebagai akibat dari kapal berbelok ke kanan (searah jarum jam) membentuk busur lingkaran pertama kemudian bergerak membentuk garis lurus dan berbelok ke kanan kembali membentuk busur lingkaran kedua. Adapun proses perhitungan panjang lintasan RSR sebagai berikut:

1. Menentukan posisi awal ρ_s dan posisi akhir ρ_f pada koordinat kartesius $(x; y)$, sudut hadap kapal dan jari-jari minimum kelengkungan lingkaran ρ yang akan dibentuk:

$$P_s = [x_s, y_s, \psi_s, \rho_s]$$

$$P_f = [x_f, y_f, \psi_f, \rho_f]$$

2. Menentukan titik pusat busur lingkaran yang dibentuk dengan batas jari-jari minimum dengan arah belok kapal ke kanan pada busur lingkaran awal (x_{cs}, y_{cs}) dan busur lingkaran akhir (x_{cf}, y_{cf}) menggunakan rumus berikut:

$$(x_{cs}, y_{cs}) = (x_s - \rho_s \cos(\psi_s + \frac{\pi}{2}), y_s - \rho_s \sin(\psi_s + \frac{\pi}{2}))$$

$$(x_{cf}, y_{cf}) = (x_f - \rho_f \cos(\psi_f + \frac{\pi}{2}), y_f - \rho_f \sin(\psi_f + \frac{\pi}{2}))$$

3. Menghitung jarak pusat lingkaran dengan geometri euclidean berikut :

$$\|c\| = \sqrt{(x_{cs} - x_{cf})^2 + (y_{cs} - y_{cf})^2}$$

4. Menganalisis eksistensi lintasan Dubins yang berbentuk RSR dengan syarat batas berikut :

$$|\rho_s - c| < \rho_f \text{ dan } |\rho_f - c| < \rho_s$$

Jika syarat terpenuhi maka lintasan yang terbentuk tidak feasible sedangkan jika syarat tidak terpenuhi maka lintasan yang terbentuk feasible.

5. Menentukan sudut kemiringan garis yang dibentuk dari pusat lingkaran awal ke pusat lingkaran akhir yang selanjutnya disebut dengan dengan rumus sebagai berikut:

$$\gamma = \arctan \left(\frac{y_{cs} - y_{cf}}{x_{cs} - x_{cf}} \right)$$

6. Menentukan titik akhir dari busur lingkaran awal sebelum membentuk garis yang disebut tangen exit (P_x) dan titik akhir dari lintasan garis sebelum membentuk lintasan busur lingkaran akhir disebut tangen entry (P_N). Sebelum menentukan kedua titik tersebut harus ditentukan terlebih dulu sudut entry (θ_{en}) dan sudut exit (θ_{ex}) dari sudut hadap kapal ketika melalui kedua titik tersebut. Perhitungan kedua sudut tersebut diberikan sebagai berikut:

$$\theta_{en} = \theta_e + \frac{\pi}{2} \text{ dan } \theta_{ex} = \theta_e + \frac{\pi}{2} + \gamma$$

Sehingga perhitungan koordinat P_x dan P_N sebagai berikut:

$$P_x = (x_{cs} + \rho_s \cos(\theta_{ex}), y_{cs} + \rho_s \sin(\theta_{ex}))$$

$$P_N = (x_{cf} + \rho_f \cos(\theta_{en}), y_{cf} + \rho_f \sin(\theta_{en}))$$

7. Panjang lintasan garis atau jarak antara titik tangen entry dan tangen exit dihitung menggunakan rumus berikut :

$$|P_x P_N| = \sqrt{(x_{P_x} - x_{P_N})^2 + (y_{P_x} - y_{P_N})^2}$$

8. Selanjutnya panjang busur lingkaran awal dan akhir dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\text{Panjang busur} = \text{keliling lingkaran} \times \frac{\text{sudut}}{360}$$

Untuk panjang busur lingkaran awal dihitung menggunakan rumus berikut:

$$L_{arc,start} = \pi \times \rho_s \times \frac{((\psi_s \pm \frac{\pi}{2})) - \theta_{ex}}{180^\circ}$$

Untuk panjang busur lingkaran akhir dihitung menggunakan rumus berikut:

$$L_{arc,finish} = \pi \times \rho_f \times \frac{((\psi_f \pm \frac{\pi}{2})) - \theta_{en}}{180^\circ}$$

9. Panjang lintasan total dirumuskan sebagai berikut:

$$L_{Dubins} = L_{arc,start} + L_{garissinggung} + L_{arc,finish}$$

2.3.2 Lintasan LSL

Lintasan LSL adalah lintasan yang terbentuk sebagai akibat dari kapal berbelok ke kiri (berlawanan arah jarum jam) membentuk busur lingkaran pertama kemudian bergerak membentuk garis lurus dan berbelok ke kiri kembali membentuk busur lingkaran kedua. Adapun proses perhitungan panjang lintasan LSL hampir sama dengan perhitungan panjang lintasan RSR namun terdapat perbedaan dalam perhitungan pusat masing-masing busur lingkaran yang dibentuk dan perhitungan sudut tangen entry dan sudut tangen exit. Adapun perhitungan pusat busur lingkaran sebagai berikut:

$$(x_{cs}, y_{cs}) = (x_s - \rho_s \cos(\psi_s - \frac{\pi}{2}), y_s - \rho_s \sin(\psi_s - \frac{\pi}{2}))$$

$$(x_{cf}, y_{cf}) = (x_f - \rho_f \cos(\psi_f - \frac{\pi}{2}), y_f - \rho_f \sin(\psi_f - \frac{\pi}{2}))$$

dan perhitungan sudut tangen entry dan sudut tangen exit sebagai berikut :

$$\theta_{en} = \theta_e - \frac{\pi}{2} + \gamma \text{ dan } \theta_{ex} = \theta_e - \frac{\pi}{2} + \gamma$$

Perhitungan yang lain sama dengan perhitungan lintasan RSR.

2.3.3 Lintasan RSL

Lintasan RSL adalah lintasan yang terbentuk sebagai akibat dari kapal berbelok ke kanan (searah jarum jam) saat membentuk busur lingkaran pertama kemudian bergerak membentuk garis lurus dan berbelok ke kiri saat membentuk busur lingkaran kedua. Adapun proses perhitungan panjang lintasan RSL sebagai berikut:

1. Menentukan pusat busur lingkaran yang terbentuk dengan menggunakan batas jari-jari minimum dengan

kapal berbelok ke arah kanan saat membentuk busur lingkaran pertama dan berbelok ke arah kiri saat membentuk busur lingkaran kedua dengan rumus sebagai berikut:

$$(x_{cs}, y_{cs}) = (x_s - \rho_s \cos(\psi_s + \frac{\pi}{2}), y_s - \rho_s \sin(\psi_s + \frac{\pi}{2}))$$

$$(x_{cf}, y_{cf}) = (x_f - \rho_f \cos(\psi_f - \frac{\pi}{2}), y_f - \rho_f \sin(\psi_f - \frac{\pi}{2}))$$

2. Menganalisis eksistensi lintasan Dubins yang berbentuk RSL dengan syarat sebagai berikut:

$$|\rho_s| + |\rho_f| > c$$

Jika syarat tersebut terpenuhi maka lintasan yang terbentuk tidak feasible sedangkan jika syarat tidak terpenuhi maka lintasan feasible. Jari-jari kedua busur lingkaran dipastikan tidak beririsan dengan adanya syarat tersebut.

3. Menentukan sudut yang dibentuk oleh garis c dan selisih jari-jari lingkaran sebagai berikut:

$$\theta_e = \arctan \left(\frac{\sqrt{c^2 - (|\rho_s + \rho_f|)}}{|\rho_s + \rho_f|} \right)$$

4. Menentukan sudut tangen entry dan sudut tangen exit sebagai berikut:

$$\theta_{en} = \theta_e + \frac{\pi}{2} + \gamma \text{ dan } \theta_{ex} = \theta_e + \frac{\pi}{2} + \gamma$$

Untuk perhitungan yang lain sama dengan perhitungan lintasan RSR.

2.3.4 Lintasan LSR

Lintasan LSR adalah lintasan yang terbentuk sebagai akibat dari kapal berbelok ke kiri (berlawanan arah jarum jam) saat membentuk busur lingkaran pertama kemudian bergerak membentuk garis lurus dan berbelok ke kanan saat membentuk busur lingkaran kedua. Adapun proses perhitungan panjang lintasan LSR sebagai berikut:

1. Menentukan pusat busur lingkaran yang terbentuk dengan menggunakan batas jari-jari minimum dengan kapal berbelok ke arah kiri (berlawanan arah jarum jam) saat membentuk busur lingkaran pertama dan berbelok ke arah kanan saat membentuk busur lingkaran kedua dengan rumus sebagai berikut:

$$(x_{cs}, y_{cs}) = (x_s - \rho_s \cos(\psi_s - \frac{\pi}{2}), y_s - \rho_s \sin(\psi_s - \frac{\pi}{2}))$$

$$(x_{cf}, y_{cf}) = (x_f - \rho_f \cos(\psi_f + \frac{\pi}{2}), y_f - \rho_f \sin(\psi_f + \frac{\pi}{2}))$$

2. Menganalisis eksistensi lintasan Dubins yang berbentuk RSL dengan syarat sebagai berikut:

$$|\rho_s| + |\rho_f| > c$$

Jika syarat tersebut terpenuhi maka lintasan yang terbentuk tidak feasible sedangkan jika syarat tidak terpenuhi maka lintasan feasible. Jari-jari kedua busur lingkaran dipastikan tidak beririsan dengan adanya syarat tersebut.

3. Menentukan sudut yang dibentuk oleh garis c dan selisih jari-jari lingkaran sebagai berikut:

$$\theta_e = \arctan \left(\frac{\sqrt{c^2 - (|\rho_s + \rho_f|)}}{|\rho_s + \rho_f|} \right)$$

4. Menentukan sudut tangen entry dan sudut tangen exit sebagai berikut:

$$\theta_{en} = \theta_e - \frac{\pi}{2} + \gamma \text{ dan } \theta_{ex} = \theta_e - \gamma$$

Untuk perhitungan yang lain sama dengan perhitungan lintasan RSR.

2.4 Keterkontrolan dan Keteramatan

Diberikan sistem lineartime-invariant yang berdimensi- n yang disajikan pada persamaan

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \\ y = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (2.16)$$

Definisi 2.5.1. Sistem linear dikatakan terkontrol bila untuk setiap keadaan sebarang $x(0) = x_0$ ada masukan $u(t)$ yang tidak dibatasi mentransfer keadaan x_0 ke sebarang keadaan akhir $x(t_1) = x_1$ dengan waktu akhir t_1 hingga[9].

Syarat cukup dan perlu suatu sistem linear dikatakan terkontrol, jika matriks:

$$M_c = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^{n-1}B]$$

mempunyai *rank* sama dengan n .

Definisi 2.5.2. Bila setiap keadaan awal $x(0) = x_0$ secara tunggal dapat diamati dari setiap pengukuran keluaran sistem (2.16) dari waktu $t = 0$ ke $t = t_1$, maka sistem dikatakan teramati[9]. Syarat cukup dan perlu suatu sistem linear dikatakan teramati, jika matriks:

$$M_c = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$

mempunyai rank sama dengan n .

2.5 Gangguan Lingkungan pada Kapal

Sekitar sistem merupakan faktor terkuat yang mempengaruhi kestabilan sistem tersebut[9]. Ketika bermanuver, sebuah kapal akan berinteraksi dengan lingkungan. Sehingga gangguan lingkungan merupakan faktor yang harus diperhitungkan khususnya pada kapal. Tipe dari gangguan lingkungan di laut antara lain: gelombang, angin, dan arus laut. Pada penelitian ini, gangguan yang diberikan berasal dari gelombang laut. Gangguan ini, merupakan akibat dari pergerakan angin sehingga menimbulkan gelombang pada permukaan air laut. Persamaan gelombang yang memenuhi gerakan sway dan yaw adalah[8] :

$$Y_{wave} = -\rho g B L T \sin(\beta) A k \sin(\omega t)$$

$$N_{wave} = \frac{1}{24} \rho g B L (L^2 - B^2) \sin(2\beta) A k \sin(\omega t)$$

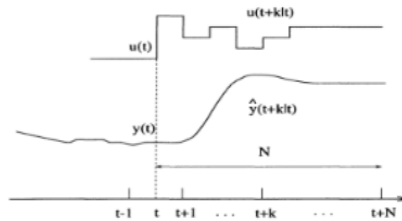
Dengan ω adalah frekuensi gelombang terhadap sistem dinamika kapal ($\omega = 0,1$), Ak nilai amplitudo gelombang setelah dikalikan faktor pengali *RAO Response Amplitude Operation* ($Ak = 0,001$), β merupakan sudut datang gelombang. Diasumsikan bahwa untuk gaya luar searah sumbu-x untuk gerak rotasi tidak dipengaruhi oleh gelombang laut, sehingga $K_{waves} = 0$. Maka didapatkan vektor gangguan untuk dinamika posisi kapal sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} v_{wave}' \\ r_{wave}' \\ \psi_{wave}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,70 \cdot 10^{-4} \sin(0.1t) + 9,537 \cdot 10^{-6} (\sin(0.1t))^2 \\ -1,416 \cdot 10^{-4} \sin(0.1t) + 1,6 \cdot 10^{-6} (\sin(0.1t))^2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

2.6 Model Predictive Control (MPC)

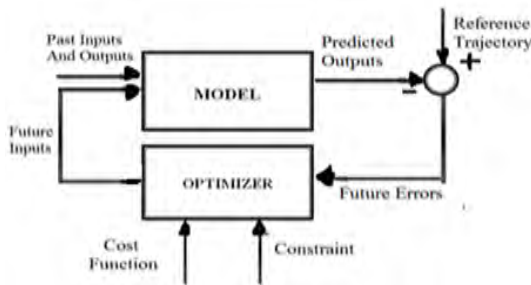
Metodologi dari MPC ditunjukkan pada Gambar 2.5. Output N prediksi horizon ke depan diprediksi pada setiap t menggunakan proses model. Prediksi output ini

bergantung pada nilai yang diketahui pada t (input dan output sebelumnya) dan sinyal kendali ke depan u yang dikirim pada sistem dan dihitung kembali[9]. Sinyal kendali u diperoleh dari hasil optimasi fungsi objektif yang biasanya menyatakan error antara sinyal prediksi output dan prediksi lintasan referensi.



Gambar 2.5: Strategi MPC[9]

Struktur dasar MPC yang digunakan dalam implementasi strategi tersebut diberikan sesuai Gambar 2.6.



Gambar 2.6: Struktur dasar MPC[9]

Langkah kerja dari MPC seperti yang terlihat pada Gambar 2.6 dapat diilustrasikan sebagai berikut: awalnya, sistem telah memiliki model dari plant. Data input dan output sebelumnya masuk melalui port input MPC. Dari

input dan output ini dilakukan estimasi berdasarkan model plant yang telah didefinisikan sebelumnya. Estimasi ini menghasilkan output yang disebut predicted output yang kemudian nilainya dibandingkan dengan reference trajectory. Dari hasil perbandingan ini, akan menghasilkan kesalahan yang disebut future error. Future error ini kemudian masuk ke dalam blok optimizer. Di sini, optimizer berfungsi untuk bekerja di dalam rentang constraint yang telah diberikan dengan tujuan untuk meminimalkan cost function, yang merupakan fungsi kriteria yang dibentuk dari fungsi kuadratik kesalahan antara sinyal predicted output dengan *reference trajectory*[9].

MPC kemudian mengambil keputusan untuk meminimalkan future error tersebut dengan keputusan yang masih berada dalam constraint yang telah ditetapkan. Hasil dari blok ini disebut future input yang dikembalikan bersama-sama dengan data input dan output sebelumnya untuk diestimasi kembali. Perhitungan ini berlangsung seterusnya dan berulang-ulang. Karena adanya koreksi input berdasarkan output terprediksi inilah yang membuat MPC mampu bekerja menghasilkan respon yang semakin mendekati reference trajectory. Keluaran proses dan pengendali terprediksi pada MPC menggunakan konsep prediction horizon yaitu seberapa jauh prediksi ke depan yang diharapkan. Optimizer dinyatakan dengan fungsi objektif yang diminimumkan untuk mendapatkan input yang optimal sehingga dapat digunakan kembali pada model untuk perhitungan selanjutnya. Model ruang keadaan waktu diskrit diberikan sebagai berikut:

$$x_m(k+1) = A_mx_m(k) + B_mu(k) + B_gw(k)$$

$$\bar{y}(k) = C_mx_m(k)$$

dengan $w(k)$ adalah input gangguan dan bentuk umum dari fungsi objektif diberikan sebagai berikut:

$$J(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\hat{r}(k+i|k) - \hat{y}(k+i|k)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta \hat{u}(k+i|k)\|_{R(i)}^2$$

Dengan $\hat{y}(k+i|k)$ adalah prediksi output plant secara internal, $\Delta \hat{u}(k+i|k)$ adalah selisih variabel input pada waktu kedepan, $k+i$, yang diprediksi pada waktu ke k . $Q(i)$ dan $R(i)$ adalah matriks simetri definit positif dalam bentuk kuadrat yang bisa menjadi fungsi waktu. Parameter untuk adaptasi kendali adalah prediksi horizon N_p , kendali horizon N_c dengan $N_p > N_c > 1$, matriks Q dan R serta referensi trayektori r .

Jika terdapat lebih dari satu input, maka kendala dispesifikan masing-masing input. Kendala-kendala tersebut yaitu :

1. Kendala pada variasi pertambahan variabel kendali ΔU
Misal diberikan batas atas ΔU^{max} dan batas bawah ΔU^{min} maka constraint dispesifikan dalam bentuk

$$\Delta U^{min} < \Delta U < \Delta U^{max}$$

2. Kendala pada amplitude variabel kendali u

$$U^{min} < U < U^{max}$$

3. Kendala output

$$Y^{min} < Y < Y^{max}$$

Penyelesaian masalah sistem dengan kendala berupa pertidaksamaan linier menggunakan metode quadratic programming sehingga diperoleh fungsi objektif dalam

bentuk lain, yaitu:

Minimum

$$J = \frac{1}{2}x^T + E_x + x^T F$$

Dengan

$$P_x \leq h$$

$$Yj = b$$

dimana matriks E ; F ; P ; h ; Y dan b merupakan matriks dan vektor yang cocok dalam masalah quadratic programming.

2.7 Disturbance Compensating Model Predictive Control (DC -MPC)

Gangguan pada saat $k - 1$ yaitu $w(k - 1)$ dapat diperkirakan dengan persamaan berikut:

$$\hat{w}(k - 1) = x(k) - Ax(k - 1) - Bu(k - 1)$$

Ketika waktu sampling T_s kecil dan gangguan berubah perlahan-lahan terhadap waktu, kita dapat membuat asumsi berikut[4]:

Gangguan saat langkah k , $w(k)$ bisa diestimasi dengan

$$w(k) = \hat{w}(k - 1) + \varepsilon$$

Desain DC-MPC mempunyai beberapa langkah sebagai berikut[4]:

1. Pada saat k , hitung gangguan dari $\hat{w}(k - 1)$ pada langkah waktu sebelumnya menggunakan $k - 1$ dan nilai yang terukur dari $x(k)$, $x(k - 1)$ dan $u(k - 1)$.
2. Hitung kontrol kompensasi gangguan Δu^* dengan memecahkan masalah optimasi dimensi rendah $\Delta(\hat{w}(k - 1))$ berikut:

$$\min_{\Delta u^* \in R^{n_i}} \|M_1 B \Delta u^* + M_1 \hat{w}(k - 1)\| \quad (2.17)$$

Dengan

$$M_1 B \Delta u^* \leq -M_1 \hat{w}(k-1) - E$$

$$M_2 \Delta u^* \leq N_2$$

dimana $E = \max(M_1 \varepsilon)$ dengan ε merupakan selisih antara gelombang laut ke - k dengan gelombang laut estimasi ke - $k-1$. solusi optimal untuk $P\Delta(\hat{w}(k-1))$ adalah Δu^* .

3. Memecahkan masalah optimasi $P(x(k), \Delta u^*)$.

$$J(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\hat{r}(k+i|k) - \hat{y}(k+i|k)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta \hat{u}(k+i|k)\|_{R(i)}^2$$

Dengan

$$x(k|k) = x(k)$$

$$x(k+i+1|k) = Ax(k+i|k) + Bu(k+i|k), i = 1, \dots, N_p - 1$$

$$M_1 x(k+i+1|k) \leq D, i = 0, 1, \dots, N_p - 1$$

$$M_2 u(k|k) \leq N_2 - M_2 \Delta u^*,$$

$$M_2 u(k+i|k) \leq N_2, i = 0, 1, \dots, N_p - 1$$

Sehingga didapat solusi dari $P(x(k), \Delta u)$ sebagai $\{u(k|k), u(k+1|k), \dots, u(k+N_p-1|k)\}$

4. Menerapkan kontrol berikut untuk sistem:

$$u(k) = u^*(k|k) + \Delta u^*$$

Jika masalah optimasi $P\Delta(\hat{w}(k-1))$ dan $P(x(k), \Delta u^*)$ keduanya sesuai, keadaan kendala satisfaksi, yaitu $M_1 x(k+1) \leq D$ selalu dapat dijamin jika hukum

kontrol diterapkan pada sistem linear. solusi optimal yang memenuhi dengan kendala berikut:

$$\begin{aligned} M_1 B \Delta u^* &\leq -M_1 \hat{w}(k-1) - E \\ M_1 x^*(k+1) &\leq D \\ M_2 u^*(k|k) &\leq N_2 - M_2 \Delta u^* \end{aligned}$$

Dari berikut bahwa $M_2(u^*(k|k) + \Delta u^*) \leq N_2$ dengan demikian kendala masukan $M_2 u(k) \leq N_2$ memenuhi kontrol dan Asumsi, keadaan $x(k+1)$ diberikan oleh

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + w(k)$$

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B(M_2(u^*(k|k) + \Delta u^*) + w(k) \\ x(k+1) &= x^*(k+1|k) + B\Delta u^* + \hat{w}(k-1) + \varepsilon \\ M_1 B \Delta u^* + M_1 x^*(k+1|k) &\leq -M_1 \hat{w}(k-1) - E + D \\ M_1 B \Delta u^* + M_1 x^*(k+1|k) - M_1 \hat{w}(k-1) + E &\leq D \end{aligned}$$

Sehingga $E = \max(M_1 \varepsilon)$, $M_1 \varepsilon \leq E$, maka:

$$\begin{aligned} M_1 x(k+1) &= M_1 B \Delta u^* + M_1 x^*(k+1|k) + M_1 \hat{w}(k-1) + M_1 \varepsilon \\ &\leq M_1 B \Delta u^* + M_1 x^*(k+1|k) + \\ &\quad M_1 \hat{w}(k-1) + E \leq D \end{aligned}$$

Oleh karena itu, kendala $M_1 x(k+1) \leq D$

"Halaman ini sengaja dikosongkan."

BAB III

METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan bagaimana langkah langkah dalam penyelesaian tugas akhir ini dengan terdiri dari tujuh tahap yang digunakan sebagai berikut:

3.1 Studi literatur

Pada tahap ini, dilakukan studi literatur mengenai sistem gerak kapal, Lintasan Dubins dan DC-MPC baik melalui buku-buku, jurnal, laporan tugas akhir/thesis terdahulu ataupun artikel dari internet yang dapat menunjang penelitian. Model yang didapatkan adalah sistem gerak dengan dua derajat kebebasan, yakni sway dan yaw.

3.2 Penentuan Lintasan

Pada tahap ini akan membandingkan panjang lintasan yang feasibel (RSR,LSL,RSL,LSR) dan menentukan lintasan yang akan dilalui kapal menggunakan algoritma lintasan Dubins yang diberikan pada Gambar 3.1. Lintasan yang dihasilkan akan digunakan sebagai set point pada penerapan DC-MPC.

3.3 Membentuk Model Kapal

Pada tahap ini, dilakukan pendefinisian model matematika untuk sistem gerak kapal Davidson Shiff dengan dua deajat kebebasan. Dengan Kapal yang digunakan adalah kapal Covert kelas Sigma.

3.4 Desain Kendali menggunakan DC-MPC

pada tahap ini di lakukan langkah-langkah dalam optimasi dengan metode DC-MPC. Langkah pertama adalah

pengkajian penurunan model dinamik gerak kapal Davidson Shiff. Selanjutnya dilakukan Uji keterkontrolan dan keteramtan kemudian pendiskritan model dinamik gerak kapal menggunakan software MATLAB dengan waktu sampling 0,1 detik. Setelah itu, langkah yang dilakukan adalah penentuan fungsi objektif yang akan digunakan dalam penerapan DC-MPC sebagai fungsi tujuan dan penentuan kendala batas yang akan digunakan dalam penerapan DC-MPC. Langkah berikutnya adalah optimasi kendali kompensasi pada gangguan gelombang air laut. Langkah selanjutnya adalah penyusunan fungsi objektif dan kendala batas yang ditentukan sebelumnya ke dalam bentuk quadratic programming.

3.5 Simulasi numerik dan analisis penerapan metode DC-MPC

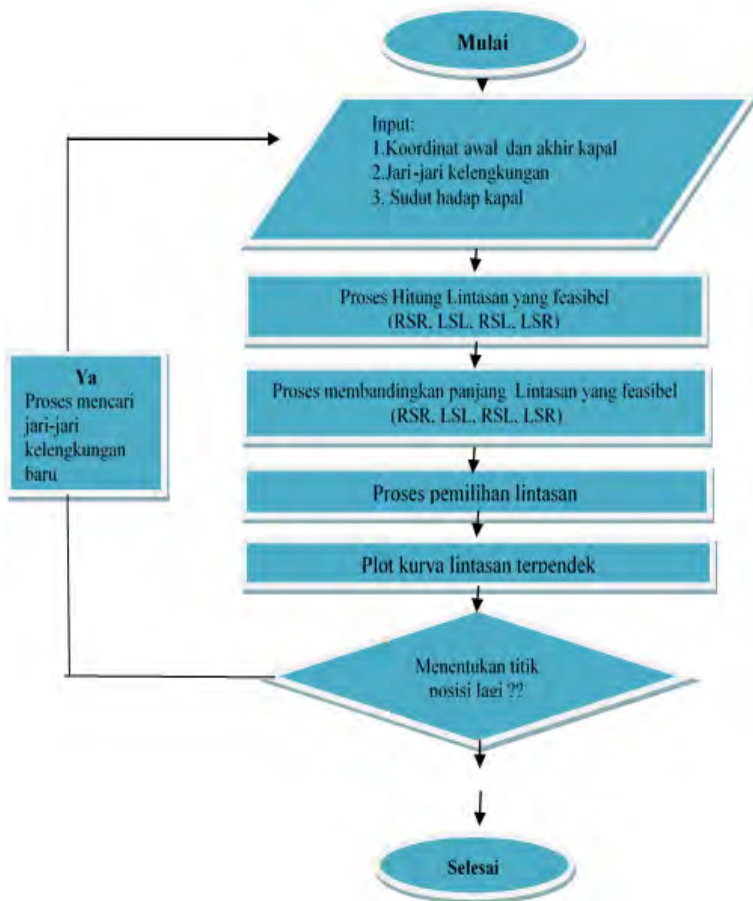
Pada tahap ini, setelah didapatkan model kendali sistem maka dilakukan simulasi akhir dengan menggunakan software Matlab untuk mendapatkan grafik pergerakan kendali dan keluaran masing-masing variabel. Selanjutnya dilakukan analisis terhadap hasil simulasi yang diperoleh.

3.6 Penarikan Kesimpulan dan Saran

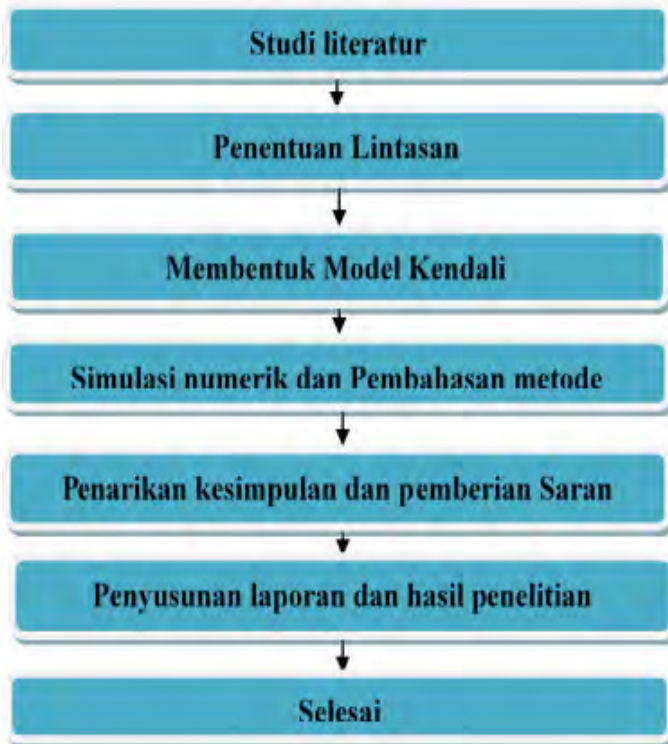
Pada tahap ini dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan hasil simulasi dan pembahasan pada tahap sebelumnya. Selanjutnya dari hasil beberapa kesimpulan tersebut diberikan saran untuk penelitian selanjutnya.

3.7 Penulisan Laporan Tugas Akhir

Pada tahap ini dilakukan pembuatan laporan Tugas Akhir setelah melakukan simulasi dan menjawab permasalahan yang ada pada topik Tugas Akhir.



Gambar 3.1: Algoritma Perencanaan Lintasan Dubins



Gambar 3.2: Diagram Alur Penelitian

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dibahas mengenai penerapan DC- MPC pada pelacakan lintasan Dubins. Pembahasan diawali dengan perancangan lintasan Dubins. Selanjutnya dilakukan proses mengkaji model dan menganalisis sifat sistem yang direpresentasikan oleh model dan penerapan DC-MPC. Penyelesaian penerapan DC-MPC disimulasikan menggunakan software MATLAB. Setelah itu akan dilakukan analisis dari hasil simulasi.

4.1 Penentuan Lintasan

Pada Penentuan lintasan Dubins membutuhkan posisi awal kapal dan posisi akhir kapal. Kedua posisi tersebut terdiri atas posisi pada koordinat kartesius (x, y) , sudut hadap kapal (ψ) serta jari-jari minimum kelengkungan lintasan yang dalam penelitian ini dinyatakan dengan R , R diperoleh dari jari-jari putar minimum kapal yang akan ditentukan.

Sebelum menentukan R , hal yang dilakukan adalah mengidentifikasi hal-hal yang berkaitan seperti sudut kemudi yang diberikan oleh δ . jarak antara belakang dan depan kapal Covert kelas Sigma adalah $L=101,07$ meter. Kecepatan kapal pada pusat massa diberikan oleh V . Misalkan bahwa L lebih kecil bila dibandingkan dengan R maka kecepatan sudut dapat didekati dengan

$$\frac{\psi}{V} \approx \frac{1}{R} = \frac{1}{\delta}$$

atau

$$\delta = \frac{L}{R}$$

Untuk input sudut kemudi maksimal $\delta = 0,6109$ rad dengan $L=101,07$ m sehingga

$$R = \frac{L}{\delta} = \frac{101,07}{0,6109} = 167.946 \approx 168 \text{ m}$$

Setelah diperoleh R , kemudian dimisalkan posisi awal dan akhir sebagai berikut:

$$p_s = [1100 \quad 1150 \quad 180 \quad 168]$$

$$p_f = [5600 \quad 5025 \quad 180 \quad 168]$$

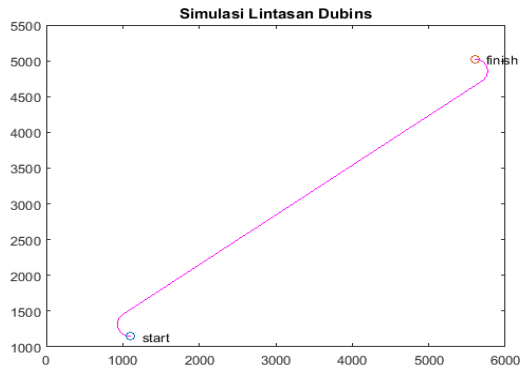
dengan menggunakan algoritma Lintasan dubins diperoleh panjang masing-masing jenis lintasan Dubins seperti pada Tabel 4.1. Berdasarkan tabel Tabel 4.1 diperoleh lintasan

Tabel 4.1: Tabel Panjang lintasan Dubins

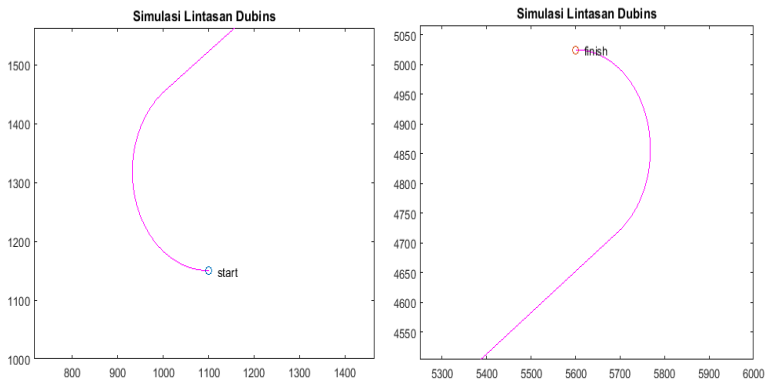
jenis lintasan	Panjang lintasan (m)
RSR	6994,1
RSL	6566,4
LSR	6994,3
LSL	8265,0

terpendek yaitu lintasan RSL dengan panjang 6566,4 m yang dianggap sebagai lintasan optimal. Adapun bentuk lintasan diberikan pada Gambar 4.1. Jari-jari putar minimum kapal bernilai kecil jika dibandingkan dengan panjang lintasan sehingga tidak terlihat bentuk lintasan di awal. Oleh karena itu dilakukan perbesaran gambar pada posisi awal dan akhir yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. Pada gambar tersebut

terlihat bahwa lintasan dimulai dengan berbelok ke kanan searah jarum jam(R) kemudian membentuk garis lurus(S) dan berbelok ke kiri berlawanan arah jarum jam(L) sehingga diperoleh lintasan RSL. .



Gambar 4.1: Lintasan Dubins jenis RSL



Gambar 4.2: Perbesaran Gambar Lintasan Dubins pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan) Lintasan

4.2 Desain Kendali dengan Menggunakan DC-MPC

Desain kendali menggunakan DC-MPC dilakukan mula-mula dengan melakukan diskritisasi model. Setelah diperoleh model sistem diskrit, desain kendali dimulai dengan membentuk fungsi objektif dan kendala batas ke dalam bentuk quadratic programming. Kemudian bentuk tersebut akan diselesaikan menggunakan *software* MATLAB.

4.2.1 Kajian Model

Dalam Tugas Akhir ini, data kapal yang digunakan sebagai model adalah data Kapal Perang Corvet Kelas Sigma. Tabel 4.2 menunjukkan data dan parameternya sebagai berikut: .

Tabel 4.2: Tabel Data Kapal Perang Corvet Kelas Sigma [11]

Parameter	keterangan	Nilai
$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	massa jenis	1024
T(m)	kedalaman	3,7
L(m)	Panjang Kapal	101,07
C_B	koefisien blok	0.65
$U \left(\frac{m}{s} \right)$	kecepatan	15,4
$X_G(m)$	koordinat x	5.25
B(m)	lebar	14
m(ton)	masa	2423

Dengan melakukan perhitungan menggunakan persamaan (2.6) sampai dengan persamaan (2.15), diperoleh:

$$\begin{aligned}
 Y'_v &= -0,005452; Y'_r = -0,000192 \\
 N'_v &= 1,2(10^{-5}); N'_r = -0,001347 \\
 N'_r &= -0,000334; Y'_r = 0,0021 \\
 Y'_v &= -0,008348; N'_v = -0,002474 \\
 N'_\delta &= -6,1502651; Y'_\delta = 12,30053
 \end{aligned}$$

bentuk normaliasi pada model persamaan (2.5) sesuai dengan sistem prime I diperoleh:

$$M' \dot{v}' + N'(u_0')v' = b' \delta'_R \quad (4.1)$$

notasi (\cdot) merupakan variabel nondimensional yang telah melalui proses normalisasi, dengan $\dot{v}' = [v', r']^T$ dan

$$M' = \begin{bmatrix} m' - Y_{\dot{v}}' & m' x_g' - Y_{\dot{r}}' \\ m' x_g' - N_{\dot{v}}' & I_z' - N_{\dot{r}}' \end{bmatrix}$$

$$N'(u_0') = \begin{bmatrix} -Y_v' & m' u_0' - Y_r' \\ -N_v' & m' x_g' u_0' - N_r' \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} Y_{\delta}' \\ N_{\delta}' \end{bmatrix}$$

dengan,

$$u_0' = \frac{u_0}{U} = \frac{u_0}{\sqrt{(u_0 + u)^2 + v^2}} \approx 1$$

untuk nilai Δu dan Δv kecil, sistem nondimensional (4.1) dapat dihubungkan dengan persamaan (2.5) dengan menerapkan transformasi yang diperoleh dengan menggunakan sistem prime I, sehingga diperoleh variabel nondimensional sebagai berikut:

$$v = U v'$$

$$r = \frac{U}{L} r'$$

$$\delta_R = \delta'_R$$

$$x_G = x'_G L$$

$$m = m' \frac{\rho}{2} L^3$$

$$I_z = I'_z \frac{\rho}{2} L^5$$

Dan juga perhatikan bahwa kita harus memilih matrik inersia $M \neq M^T$. Model ruang keadaan yang bersesuaian didapatkan dengan memilih $x = [v, r]^T$ sebagai vektor keadaan dan $u = \delta_R$ Sehingga

$$\dot{x} = Ax + b_1 u$$

dengan

$$A = -M^{-1}N = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

$$b_1 = M^{-1}b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

dan

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{(I_z - N_r')Y_v' - (m'x_g' - Y_{\dot{r}}')N_v'}{\det(M)} \\ a_{12} &= \frac{(I_z' - N_r')(Y_v' - m'u_0') - (m'x_g' - Y_{\dot{r}}')(N_r' - m'x_g'u_0')}{\det(M)} \\ a_{21} &= \frac{(m' - Y_v')N_v' - (m'x_g' - Y_v')N_v'}{\det(M)} \\ a_{22} &= \frac{(m' - Y_v')(N_r' - m'x_g'u_0') - (m'x_g' - N_v')(Y_r' - m'u_0')}{\det(M)} \\ b_1 &= \frac{(I_z - N_r')Y_{\delta'} - (m'x_g' - Y_{\dot{r}}')N_{\delta'}}{\det(M)} \\ b_2 &= \frac{(m' - Y_v')N_{\delta'} - (m'x_g' - N_{\dot{v}}')Y_{\delta'}}{\det(M)} \end{aligned}$$

Selanjutnya karena pada tugas akhir ini akan membuat kontrol pada lintasan dubins dengan variabel yang diamati adalah ψ yaitu sudut hadap kapal dan dengan meninjau persamaan $\dot{\psi} = r$. Dengan r adalah kecepatan sudut hadap kapal. Sehingga Model ruang keadaan yang bersesuaian

didapatkan dengan memilih $x = [v, r, \psi]^T$ sebagai vektor keadaan dan $u = \delta_R$ Sehingga ,

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_R$$

dengan nilai parameter diperoleh dari data kapal perang covert kelas sigma dengan 2 derajat kebebasan . Maka, persamaan menjadi sebagai berikut:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -0.7012 & -0.1606 & 0 \\ -3.0497 & -2.0397 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1592.99 \\ -8577.37 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (4.2)$$

dengan output sistem diberikan sebagai berikut:

$$\bar{y} = Cx = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x \quad (4.3)$$

4.2.2 Uji Keterkontrolan dan Keteramatan

Sebelum melakukan kendali pada sistem yang direpresentasikan oleh model, sistem harus diketahui terlebih dahulu keterkontrolan dan keteramatanya. Keterkontrolan dan keteramatan mempunyai peran penting dalam perancangan pengendali, uji keterkontrolan dan keteramatan ini menentukan bisa tidaknya dilanjutkan perancangan sistem kendali.

1. Uji Keterkontrolan Berdasarkan persamaan (4.2) diperoleh berturut-turut matriks A dan B sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0.7012 & -0.1606 & 0 \\ -3.0497 & -2.0397 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1592.99 \\ -8577.37 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Matriks keterkontrolan diberikan oleh persamaan berikut:

$$M_c = [B \quad AB \quad A^2B]$$

matriks keterkontrolan untuk input δ_R adalah:

$$M_c = \begin{bmatrix} 1592.99 & 260.28 & -2211.6 \\ -8577.3 & 1263.70 & -2656.9 \\ 0 & -8577.3 & 1263.7 \end{bmatrix}$$

2. Uji Keteramatan Berdasarkan persamaan (4.2) dan (4.3) diperoleh berturut-turut matriks A dan C sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0.7012 & -0.1606 & 0 \\ -3.0497 & -2.0397 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, C = [0 \quad 0 \quad 1]$$

Matriks keteramatan diberikan oleh persamaan berikut:

$$M_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix}$$

Matriks keteramatan diberikan oleh persamaan berikut:

$$M_o = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -3.0496 & -2.0397 & 0 \end{bmatrix}$$

Dengan menggunakan bantuan software MATLAB maka diperoleh rank $(M_c) = 3$ dan rank $(M_o) = 3$. Nilai rank dari matriks M_c dan M_o sama dengan orde sistem, sehingga sistem dapat dikatakan terkontrol dan teramat. Dengan demikian dapat dilakukan perancangan sistem kendali.

4.2.3 Diskritisasi Model

Diberikan persamaan keadaan waktu kontinu sebagai berikut :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (4.4)$$

Vektor masukan $u(t)$ pada setiap selang pencacahan diasumsikan tetap[12]. Selanjutnya digunakan notasi kT dan $(k+1)T$. Penyajian waktu diskrit dari persamaan (4.4) akan mempunyai bentuk :

$$x((k+1)T) = A_d(T)x(kT) + B_d(T)u(kT)$$

terlihat bahwa matriks A_d dan B_d bergantung pada waktu *sampling* T . Setelah periode cacah ditetapkan, maka matriks A_d dan B_d akan menjadi matriks konstan.

Pendiskritan model dapat dilakukan menggunakan software MATLAB dengan waktu *sampling* 0.1 detik sehingga diperoleh ruang keadaan pada waktu diskrit sebagai berikut:

$$A(T) = \begin{bmatrix} 0.9345 & -0.0140 & 0 \\ -0.2663 & 0.8176 & 0 \\ -0.0139 & 0.0905 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$B(0.1) = \begin{bmatrix} 160.3 \\ -798.7 \\ -40.89 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

sehingga diperoleh model pada waktu diskrit sebagai berikut:

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 0.9345 & -0.0140 & 0 \\ -0.2663 & 0.8176 & 0 \\ -0.0139 & 0.0905 & 1 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 160.3 \\ -798.7 \\ -40.89 \end{bmatrix} u(k)$$

4.2.4 Desain Kendali

Pada sub bab ini akan dijelaskan tentang perancangan desain kendali menggunakan DC-MPC dengan tahapan perancangan sebagai berikut:

Formulasi Plan Model

Suatu sistem diskrit diberikan sebagai berikut:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (4.7)$$

$$\bar{y}(k) = Cx(k)$$

Kendali dilakukan pada sudut kemudi sehingga perubahan sudut kemudi perlu diketahui dari waktu ke waktu selama proses perjalanan kapal. Oleh karena itu didefinisikan increment input sebagai berikut:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$$

sehingga persamaan (4.7) menjadi

$$x(k+1) = Ax(k) + B(u(k-1) + \Delta u(k))$$

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k-1) + B\Delta u(k)$$

Diberikan horizon prediksi N_p dan horizon kontrol N_c dengan $N_c = N_p$ maka diperoleh

$$\begin{aligned} x(k+1|k) &= Ax(k|k) + Bu(k|k) \\ &= Ax(k+1|k) + B(u(k-1|k) + \Delta u(k|k)) \\ &= Ax(k+1|k) + Bu(k-1|k) + B\Delta u(k|k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x(k+2|k) &= Ax(k+1|k) + Bu(k+1|k) \\
&= Ax(k+1|k) + B(u(k|k) + \Delta u(k+1|k)) \\
&= Ax(k+1|k) + Bu(k|k) + B\Delta u(k+1|k) \\
&= Ax(k+1|k) + Bu(k-1|k) + B\Delta u(k|k) + B\Delta u(k+1|k)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x(k+N_p|k) &= Ax(k+N_p-1|k) + Bu(k+N_p-1|k) \\
&= Ax(k+N_p-1|k) + Bu(k-1|k) + B\Delta u(k|k) + \dots \\
&\quad B\Delta u(k+N_p-1|k)
\end{aligned}$$

dengan prediksi output sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
\hat{y}(k|k) &= C_x(k|k) \\
\hat{y}(k+1|k) &= C_x(k+1|k) \\
\hat{y}(k+2|k) &= C_x(k+2|k) \\
&\vdots \\
\hat{y}(k+c|k) &= C_x(k+N_p|k)
\end{aligned}$$

Menghitung Fungsi gangguan

Pada tugas akhir ini gangguan yang diberikan merupakan gelombang air laut sesuai dengan persamaan sebagai berikut[8]:

$$\begin{bmatrix} v_{wave}' \\ r_{wave}' \\ \psi_{wave}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,70 \cdot 10^{-4} \sin(0.1t) + 9,537 \cdot 10^{-6} (\sin(0.1t))^2 \\ -1,416 \cdot 10^{-4} \sin(0.1t) + 1,6 \cdot 10^{-6} (\sin(0.1t))^2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Dengan $t = k\Delta t$ maka persamaan (4.8) dapat ditulis:

$$w(k) = \begin{bmatrix} 1,70 \cdot 10^{-4} \sin(0.1k\Delta t) + 9,537 \cdot 10^{-6} (\sin(0.1k\Delta t))^2 \\ -1,416 \cdot 10^{-4} \sin(0.1k\Delta t) + 1,6 \cdot 10^{-6} (\sin(0.1k\Delta t))^2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Selanjutnya di hitung gangguan pada saat $k-1$ yaitu $w(k-1)$ dengan persamaan berikut:

$$\hat{w}(k-1) = x(k) - Ax(k-1) - Bu(k-1)$$

Selanjutnya dicari selisih gangguan gelombang air laut saat langkah k dengan gangguan gelombang air laut saat langkah $k-1$ yaitu

$$w(k) = \hat{w}(k-1) + \varepsilon$$

Sehingga

$$\varepsilon = w(k) - \hat{w}(k-1)$$

Menghitung kontrol kompensasi gangguan

Pada bagian ini akan dihitung kontrol kompensasi gangguan Δu^* dengan memecahkan masalah optimasi dimensi rendah $\Delta(\hat{w}(k-1))$ sesuai dengan persamaan (2.17). Untuk menyelesaikan permasalahan pada persamaan (2.17) menggunakan bantuan *Software Matlab* dengan bantuan fungsi *fmincon* diperoleh nilai Δu^*

Formulasi Fungsi Objektif

Pada bagian ini dibahas tentang formulasi untuk menentukan fungsi objektif yang digunakan untuk merancang desain kontrol. Pada tugas akhir ini sinyal kontrol bertujuan untuk meminimumkan error dari selisih antara referensi trayektori dan keluaran sistem dan juga untuk meminimumkan selisih perubahan sinyal kontrol. Maka bentuk umum dari fungsi objektif diberikan sebagai berikut:

$$J(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\hat{r}(k+i|k) - \hat{y}(k+i|k)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta \hat{u}(k+i|k)\|_{R(i)}^2$$

Dengan

$$\begin{aligned}
x(k|k) &= x(k) \\
x(k+i+1|k) &= Ax(k+i|k) + Bu(k+i|k), i = 1, \dots, N_p - 1 \\
M_1 x(k+i+1|k) &\leq D, i = 0, 1, \dots, N_p - 1 \\
M_2 u(k|k) &\leq N_2 - M_2 \Delta u^*, \\
M_2 u(k+i|k) &\leq N_2, i = 0, 1, \dots, N_p - 1
\end{aligned}$$

Dari fungsi objektif, $\hat{y}(k+i|k)$ adalah prediksi output plant secara internal, kemudian $\Delta \hat{u}(k+i|k)$ adalah selisih variabel input pada waktu kedepan, $k+i$, yang akan diprediksi pada waktu ke k . Kemudian $Q_{(i)}$ dan $R_{(i)}$ adalah matriks simetri definit positif dalam bentuk kuadrat yang bisa menjadi fungsi waktu. Selanjutnya Parameter untuk adaptasi kendali adalah prediksi horizon N_p , dan kendali horizon N_c dengan $N_p > N_c > 1$, matriks Q dan R serta referensi trayektori r .

Dengan $N_c = N_p$, sehingga diperoleh bentuk fungsi objektif sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
J(k) &= \sum_{i=1}^{N_p} \|\hat{r}(k+i|k) - \hat{y}(k+i|k)\|_{Q_{(i)}}^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta \hat{u}(k+i|k)\|_{R_{(i)}}^2 \\
&= \sum_{i=1}^{N_p} \|\hat{r}(k+i|k) - \hat{y}(k+i|k)\|_{Q_{(i)}}^2 + \|\Delta \hat{u}(k+i-1|k)\|_{R_{(i)}}^2 \\
&= \|\hat{r}(k+1|k) - \hat{y}(k+1|k)\|_{Q_{(1)}}^2 + \\
&\quad \|\hat{r}(k+2|k) - \hat{y}(k+2|k)\|_{Q_{(2)}}^2 + \dots \\
&\quad + \|\hat{r}(k+N_p|k) - \hat{y}(k+N_p|k)\|_{Q_{(N_p)}}^2 + \|\Delta \hat{u}(k|k)\|_{R_{(0)}}^2 \\
&\quad + \|\Delta \hat{u}(k+1|k)\|_{R_{(1)}}^2 + \dots + \|\Delta \hat{u}(k+N_p|k)\|_{R_{(N_p-1)}}^2
\end{aligned}$$

Dengan

$$\begin{aligned}
\|\hat{r}(k+i|k) - \hat{y}(k+i|k)\|_{Q_{(i)}}^2 &= \hat{r}(k+i|k) - \hat{y}(k+i|k)^T \\
&\quad Q_{(i)}\hat{r}(k+i|k) - \hat{y}(k+i|k) \\
&= (\hat{r}(k+i|k))^T Q_{(i)}(\hat{r}(k+i|k)) \\
&\quad - 2\hat{y}(k+i|k)^T Q_{(i)}\hat{r}(k+i|k) \\
&\quad \hat{y}(k+i|k)^T Q_{(i)}\hat{y}(k+i|k)
\end{aligned}$$

maka fungsi objektif menjadi

$$\begin{aligned}
J &= \hat{r}(k+1|k)^T Q_{(1)}\hat{r}(k+1|k) - 2\hat{y}(k+1|k)^T Q_{(1)}\hat{r}(k+1|k) + \\
&\quad \hat{y}(k+1|k)^T Q_{(1)}\hat{y}(k+1|k) + \hat{r}(k+2|k)^T Q_{(2)}\hat{r}(k+2|k) \\
&\quad - 2\hat{y}(k+2|k)^T Q_{(2)}\hat{r}(k+2|k) + \hat{y}(k+2|k)^T Q_{(2)}\hat{y}(k+2|k) + \dots + \\
&\quad \hat{r}(k+N_p|k)^T Q_{(N_p)}\hat{r}(k+N_p|k) \\
&\quad - 2\hat{y}(k+N_p|k)^T Q_{(N_p)}\hat{r}(k+N_p|k) + \hat{y}(k+N_p|k)^T \\
&\quad Q_{(N_p)}\hat{y}(k+N_p|k) + \Delta\hat{u}(k|k)^T R_{(0)}\Delta\hat{u}(k|k) \\
&\quad + \Delta\hat{u}(k+1|k)^T R_{(1)}\Delta\hat{u}(k+1|k) + \dots + \\
&\quad \Delta\hat{u}(k+N_p-1|k)^T R_{(N_p-1)}\Delta\hat{u}(k+N_p-1|k) \tag{4.9}
\end{aligned}$$

Dengan $y = Cx$ maka persamaan (4.9) menjadi

$$\begin{aligned}
J(k) &= \hat{r}(k+1|k)^T Q_{(1)}\hat{r}(k+1|k) - 2(Cx(k+1|k))^T Q_{(1)}\hat{r}(k+1|k) \\
&\quad (Cx(k+1|k))^T Q_{(1)}Cx(k+1|k) + \hat{r}(k+2|k)^T Q_{(2)}\hat{r}(k+2|k) \\
&\quad - 2(Cx(k+2|k))^T Q_{(2)}\hat{r}(k+2|k) + (Cx(k+2|k))^T \\
&\quad Q_{(2)}Cx(k+2|k) + \dots + \hat{r}(k+N_p|k)^T Q_{(N_p)}\hat{r}(k+N_p|k) \\
&\quad - 2(Cx(k+N_p|k))^T Q_{(N_p)}\hat{r}(k+N_p|k) \\
&\quad (Cx(k+N_p|k))^T Q_{(N_p)}Cx(k+N_p|k) + \Delta\hat{u}(k|k)^T R_{(0)}\Delta\hat{u}(k|k) \\
&\quad + \Delta\hat{u}(k+1|k)^T R_{(1)}\Delta\hat{u}(k+1|k) + \dots + \\
&\quad \Delta\hat{u}(k+N_p-1|k)^T R_{(N_p-1)}\Delta\hat{u}(k+N_p-1|k) \tag{4.10}
\end{aligned}$$

Persamaan (4.10) dapat ditulis

$$\begin{aligned}
J(k) = & \hat{r}(k+1|k)^T Q_{(1)} \hat{r}(k+1|k) + \hat{r}(k+2|k)^T Q_{(2)} \hat{r}(k+2|k) + \dots + \\
& \hat{r}(k+N_p|k)^T Q_{(N_p)} \hat{r}(k+N_p|k) + \Delta \hat{u}(k|k)^T R_{(0)} \Delta \hat{u}(k|k) + \\
& x(k+1|k)^T C^T Q_{(1)} C x(k+1|k) + \Delta \hat{u}(k+1|k)^T R_{(1)} \\
& \Delta \hat{u}(k+1|k) + x(k+2|k)^T C^T Q_{(2)} C x(k+2|k) + \dots + \\
& \Delta \hat{u}(k+N_p-1|k)^T R_{(N_p-1)} \Delta \hat{u}(k+N_p-1|k) + x(k+N_p|k)^T \\
& C^T Q_{(N_p)} C x(k+N_p|k) - 2x(k+1|k)^T C^T Q_{(1)} \hat{r}(k+1|k) - \\
& 2x(k+2|k)^T C^T Q_{(2)} \hat{r}(k+2|k) - 2x(k+2|k)^T \\
& C^T Q_{(N_p)} \hat{r}(k+N_p|k)
\end{aligned}$$

Sehingga dapat dibentuk fungsi objektif sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
J = & \begin{bmatrix} \hat{r}(k+1|k) \\ \hat{r}(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{r}(k+N_p|k) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Q_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Q_{N_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{r}(k+1|k) \\ \hat{r}(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{r}(k+N_p|k) \end{bmatrix} + \\
& \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ x(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_p-1|k) \\ x(k+N_p|k) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} R_{(0)} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & C^T Q_1 C & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & R_{N_p-1} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & C^T Q_{(N_p)} C \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ x(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_p-1|k) \\ x(k+N_p|k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ x(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_p-1|k) \\ x(k+N_p|k) \end{bmatrix}^T
\end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -2C^T Q_1 \hat{r}(k+1|k) \\ \vdots \\ 0 \\ -2C^T Q_{N_p} \hat{r}(k+N_p|k) \end{bmatrix}^T$$

Misalkan bahwa

$$J_{4N_p \times 1} = \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ x(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_p-1|k) \\ x(k+N_p|k) \end{bmatrix}$$

$$F_{4N_p \times 1} = \begin{bmatrix} 0 \\ -2C^T Q_1 \hat{r}(k+1|k) \\ \vdots \\ 0 \\ -2C^T Q_{N_p} \hat{r}(k+N_p|k) \end{bmatrix}$$

$$E_{4N_p \times 4N_p} = \begin{bmatrix} R_{(0)} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & C^T Q_1 C & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & R_{N_p-1} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & C^T Q_{(N_p)} C \end{bmatrix}$$

$$r_{4N_p \times 1} = \begin{bmatrix} \hat{r}(k+1|k) \\ \hat{r}(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{r}(k+N_p|k) \end{bmatrix}, \bar{Q} = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Q_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Q_{N_p} \end{bmatrix}$$

Sehingga diperoleh

$$\begin{aligned}
 J_{min} &= r^T \bar{Q} r + j^T E j + j^T F \\
 &= r^T \bar{Q} r + \frac{1}{2} j^T (2E) j + j^T F \\
 &= r^T \bar{Q} r + \frac{1}{2} j^T E' j + j^T F
 \end{aligned}$$

$r^T \bar{Q} r$ menghasilkan suatu konstanta yang jika diturunkan menghasilkan nilai nol maka fungsi objektif dapat hanya diwakili dengan:

$$J_{min} = \frac{1}{2} j^T E' j + j^T F$$

Formulasi Kendala Batas

Diketahui suatu fungsi objektif

$$J_{min} = \frac{1}{2} j^T E' j + j^T F$$

Dan kendala batas diberikan sebagai berikut:

$$u^{min} \leq u \leq u^{max}$$

Kendala-kendala batas tersebut akan diformulasikan ke dalam bentuk quadratic programming sebagai berikut:

$$Pj \leq h$$

$$Yj = b$$

Formulasi kendala batas diberikan sebagai berikut:

1. Formulasi kendala increment input

$$\begin{aligned}
 \Delta u^{min} &\leq \Delta u(k+i|k) \leq \Delta u^{max} \\
 \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \Delta u(k+i|k) &\leq \begin{bmatrix} -\Delta u^{min} \\ \Delta u^{max} \end{bmatrix} \\
 M_2 \Delta u(k+i|k) &\leq N_2
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Dengan

$$M_2 = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}, N_2 = \begin{bmatrix} -\Delta u^{min} \\ \Delta u^{max} \end{bmatrix}$$

2. Formulasi kendala input

Diketahui bahwa $\Delta u(k|k) = u(k|k) - u(k-1|k)$ maka

$$\Delta u(k|k) = u(k|k) - u(k-1|k)$$

$$u(k+1|k) = \Delta u(k+1|k) + u(k|k)$$

$$= \Delta u(k+1|k) + \Delta u(k|k) + u(k-1|k)$$

$$u(k+2|k) = \Delta u(k+2|k) + \Delta u(k+1|k) + \Delta u(k|k) + u(k-1|k)$$

$$\vdots$$

$$u(k+N_p-1|k) = \Delta u(k+N_p-1|k) + u(k+N_p-2|k)$$

$$+ \dots + \Delta u(k+1|k) + \Delta u(k|k) + u(k-1|k)$$

Sehingga diperoleh

$$\begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ u(k+1|k) \\ \vdots \\ u(k+N_p-1|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} u(k-1|k) + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} j$$

misalkan bahwa

$$U = \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ u(k+1|k) \\ \vdots \\ u(k+N_p-1|k) \end{bmatrix}, C_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

maka diperoleh

$$U = C_1 u(k-1|k) + C_2 j$$

$$\begin{aligned} u^{min} &\leq u(k+i|k) \leq u^{max} \\ u^{min} &\leq C_1 u(k+i|k) + C_2 j \leq u^{max} \\ \begin{bmatrix} -C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} j &\leq \begin{bmatrix} -u^{min} + C_1 u(k-1|k) \\ u^{max} + C_1 u(k-1|k) \end{bmatrix} \\ M_3 j &\leq N_3 \end{aligned} \quad (4.12)$$

Pertidaksamaan (4.11) dan(4.12) dapat dibentuk menjadi satu pertidaksamaan sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} M_2 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & M_2 & 0 \\ M_3 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ x(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_p-1|k) \\ x(k+N_p|k) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} N_2 \\ N_2 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix}$$

$$Pj \leq h$$

Dengan

$$P = \begin{bmatrix} M_2 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & M_2 & 0 \\ M_3 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}, h = \begin{bmatrix} N_2 \\ N_2 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix}$$

Kendala batas persamaan akan dibentuk dari persamaan (4.11) dengan horizon prediksi N_p maka

persamaan kendala diperoleh sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} -B & I & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -B & -A & -B & I & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -B & 0 & -B & -A & -B & I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -B & 0 & -B & 0 & -B & 0 & \cdots & I \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ x(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_p-1|k) \\ x(k+N_p|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ax(kk) + Bu(k-1|k) \\ u(k-1k) \\ u(k-1k) \\ \vdots \\ u(k-1k) \end{bmatrix}$$

$$Yj = b$$

Dengan

$$Y = \begin{bmatrix} -B & I & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -B & -A & -B & I & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -B & 0 & -B & -A & -B & I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -B & 0 & -B & 0 & -B & 0 & \cdots & I \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} Ax(kk) + Bu(k-1|k) \\ u(k-1k) \\ u(k-1k) \\ \vdots \\ u(k-1k) \end{bmatrix}$$

Kemudian untuk meminimumkan fungsi gangguan pada kapal dilakukan perumusan kompensasi gangguan sebagai berikut:

Meminimumkan fungsi tujuan

$$\|M_1 B \Delta u^* + M_1 \hat{w}(k-1)\|$$

dengan kendala

$$M_1 B \Delta u^* \leq -M_1 \hat{w}(k-1) - E$$

$$M_2 \Delta u^* \leq N_2$$

$E = \max(C\varepsilon)$ dengan ε merupakan selisih antara gelombang laut ke- k dengan gelombang laut estimasi ke- $(k-1)$. Selanjutnya didapatkan keluaran berupa Δu , nilai ini kemudian dijadikan faktor yang mempengaruhi batas atas dari kendala kontrol ke- k pada proses optimasi MPC. Sehingga matriks h pada persamaan sebelumnya menjadi:

$$h = \begin{bmatrix} N_2 - M_2 \Delta u^* \\ N_2 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_2 \\ N_2 \end{bmatrix}$$

Selanjutnya untuk menentukan sinyal kontrol yang optimal dilakukan perhitungan dengan menggunakan *software Matlab* untuk menyelesaikan masalah *quadratic programming* dari matriks $E ; F ; P ; h ; Y$ dan b . Hasil dari sinyal kontrol tersebut kemudian akan digunakan untuk mengontrol sistem pada persamaan:

$$u(k) = u^*(k|k) + \Delta u^*$$

Pada penelitian-penelitian sebelumnya untuk batas sudut rudder kapal biasanya antara 35 derajat sampai

35 derajat, maka pada tugas akhir ini diberikan nilai kendala batas sebagai berikut:

$$-0.6109(rad) \leq u \leq 0.6109(rad)$$

.

4.3 Hasil Simulasi

Pada tahap ini dilakukan simulasi dengan nilai koefisien bobot $Q = 300$ dan $R = 1$. Selanjutnya akan disimulasikan beberapa kasus pada permasalahan kendali sudut kemudi pada kapal. Pada simulasi yang dilakukan, nilai awal variabel keadaan didefinisikan $x_1(1) = 0$ m/s dan $x_2(1) = 0$ m/s. Selain itu juga didefinisikan nilai awal sudut kemudi yaitu $u(1) = 0$ rad.

Pengaruh Jenis Lintasan dengan Nilai Horizon Prediksi yang Sama

Untuk mengetahui pengaruh jenis lintasan terhadap hasil pengendalian DC-MPC dilakukan uji simulasi dengan lintasan yang berbeda. Parameter-parameter yang lain bernilai tetap. Simulasi dilakukan selama 60 detik dengan waktu sampling 0.1 detik.

Simulasi 1

Lintasan yang pertama menggunakan posisi awal dan akhir kapal yang didefinisikan sebagai berikut:

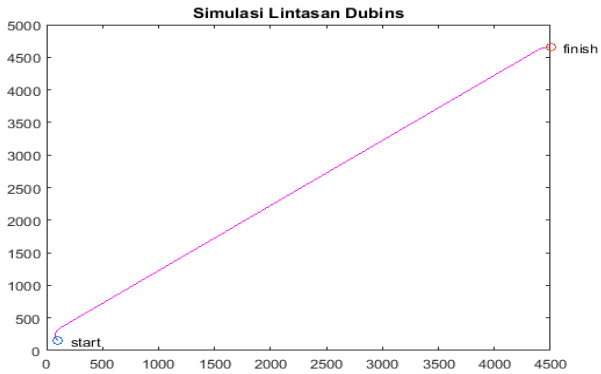
$$\begin{aligned} p_s &= [100 \quad 150 \quad 120 \quad 168] \\ p_f &= [4500 \quad 4655 \quad 0 \quad 168] \end{aligned}$$

dengan menggunakan algoritma lintasan dubins diperoleh panjang masing-masing jenis lintasan Dubins pada Tabel 4.3.

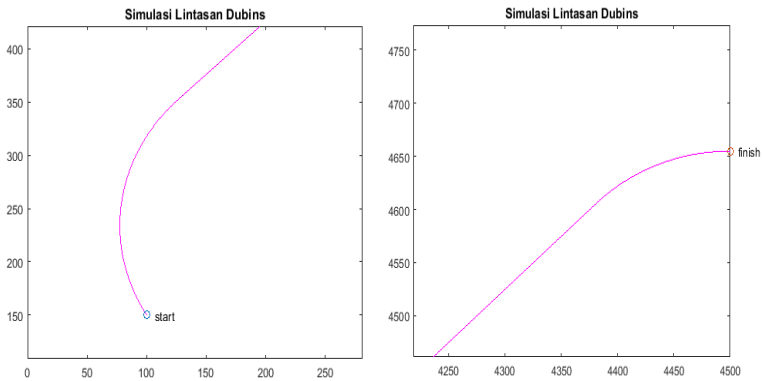
Tabel 4.3: Tabel Panjang lintasan Dubins

jenis lintasan	Panjang lintasan (m)
RSR	6367.6
RSL	7397.6
LSR	7312.7
LSL	8338.8

Berdasarkan tabel Tabel 4.3 diperoleh lintasan terpendek yaitu lintasan RSR dengan panjang 6367.6 m yang dianggap sebagai lintasan optimal. Adapun bentuk lintasan diberikan



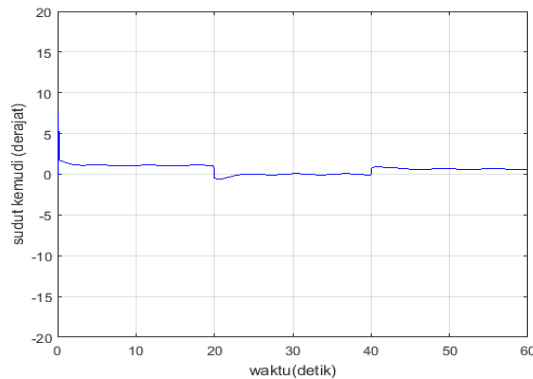
Gambar 4.3: Lintasan Dubins jenis RSR



Gambar 4.4: Perbesaran Gambar Lintasan Dubins pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan) Lintasan

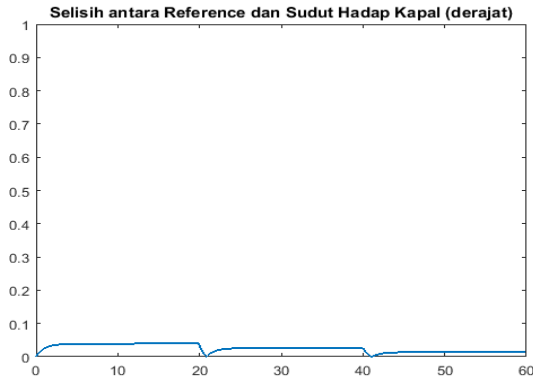
pada Gambar 4.3. Jari-jari putar minimum kapal bernilai kecil jika dibandingkan dengan panjang lintasan sehingga kurang terlihat bentuk lintasan di awal. Oleh karena itu dilakukan perbesaran gambar pada posisi awal dan akhir yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Pada gambar tersebut terlihat bahwa lintasan dimulai dengan berbelok ke kanan searah jarum jam(R) kemudian membentuk garis lurus(S) dan berbelok ke kekanan searah jarum jam(R) sehingga diperoleh lintasan RSR.

Hasil uji simulasi untuk nilai horizon prediksi $N_p = 100$ menunjukkan bahwa sudut kemudi seperti pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5: Hasil kendali sudut kemudi kapal pada Lintasan Dubins RSR

Pada Gambar 4.5 terlihat bahwa nilai sudut kemudi u bernilai mendekati 0 yang merepresentasikan kapal bergerak lurus dan pada beberapa nilai akhir sudut kemudi u mengalami perubahan yang berarti bahwa kapal berbelok. Berdasarkan nilai sudut kemudi diperoleh bahwa kapal bergerak lurus kemudian berbelok ke kanan sesuai dengan



Gambar 4.6: Hasil Selisih antara Reference dan sudut hadap kapal

referensi lintasan Dubins RSR.

Berdasarkan Gambar 4.6 terlihat bahwa selisih antara nilai reference perubahan sudut hadap kapal dan perubahan sudut hadap kapal hasil kendali bernilai kecil atau dapat dikatakan hampir sama namun pada beberapa titik di awal terdapat selisih yang cukup besar karena adanya pengaruh *tracking* lintasan.

Simulasi 2

Lintasan yang kedua menggunakan posisi awal dan akhir kapal yang didefinisikan sebagai berikut:

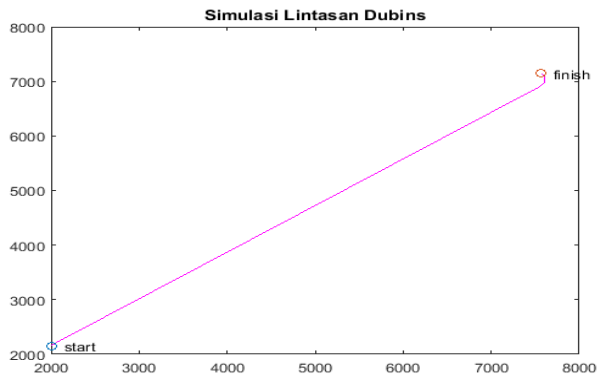
$$\begin{aligned} p_s &= [2000 \quad 2150 \quad 60 \quad 168] \\ p_f &= [7560 \quad 7150 \quad 135 \quad 168] \end{aligned}$$

dengan menggunakan algoritma lintasan dubins diperoleh panjang masing-masing jenis lintasan Dubins pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4: Tabel Panjang lintasan Dubins

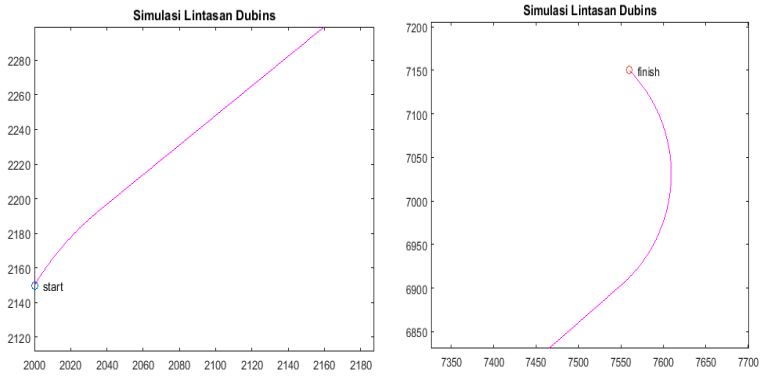
jenis lintasan	Panjang lintasan (m)
RSR	8430.8
RSL	7585.8
LSR	10120
LSL	8639.2

Berdasarkan tabel Tabel 4.4 diperoleh lintasan terpendek yaitu lintasan RSL dengan panjang 7585.8 m yang dianggap sebagai lintasan optimal. Adapun bentuk lintasan diberikan pada Gambar 4.7. Jari-jari putar minimum kapal bernilai



Gambar 4.7: Lintasan Dubins jenis RSL

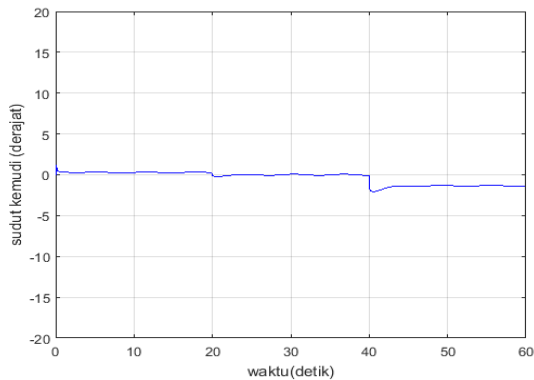
kecil jika dibandingkan dengan panjang lintasan sehingga kurang terlihat bentuk lintasan di awal. Oleh karena itu dilakukan perbesaran gambar pada posisi awal dan akhir yang ditunjukkan pada Gambar 4.8. Pada gambar tersebut terlihat bahwa lintasan dimulai dengan berbelok ke kanan searah jarum jam(R) kemudian membentuk garis lurus(S) dan berbelok ke kiri berlawanan arah jarum jam(L) sehingga



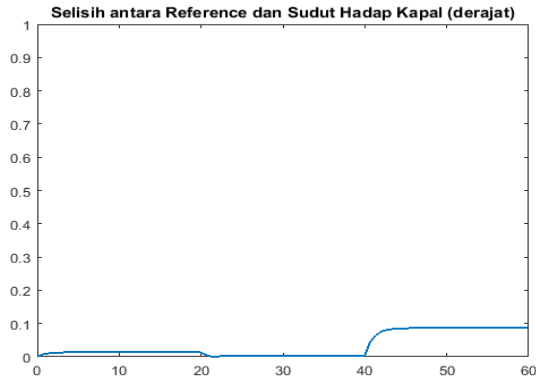
Gambar 4.8: Perbesaran Gambar Lintasan Dubins pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan) Lintasan

diperoleh lintasan RSL.

Hasil uji simulasi untuk nilai horizon prediksi $N_p = 100$ menunjukkan bahwa sudut kemudi diberikan seperti pada Gambar 4.8.



Gambar 4.9: Hasil kendali sudut kemudi kapal pada Lintasan Dubins RSL



Gambar 4.10: Hasil Selisih antara Reference dan sudut hadap kapal

Pada Gambar 4.9 terlihat bahwa nilai sudut kemudi u bernilai mendekati 0 yang merepresentasikan kapal bergerak lurus dan pada beberapa nilai akhir sudut kemudi u bernilai negatif yang menunjukkan bahwa kapal berbelok ke kiri. Berdasarkan nilai sudut kemudi diperoleh bahwa kapal bergerak lurus kemudian berbelok ke kiri sesuai dengan referensi lintasan Dubins RSL.

Berdasarkan Gambar 4.10 terlihat bahwa selisih antara nilai reference perubahan sudut hadap kapal dan perubahan sudut hadap kapal hasil kendali bernilai kecil atau dapat dikatakan hampir sama namun pada beberapa titik di akhir terdapat selisih yang cukup besar karena adanya pengaruh *tracking* lintasan.

Simulasi 3

Lintasan yang kedua menggunakan posisi awal dan akhir

kapal yang didefinisikan sebagai berikut:

$$p_s = [250 \ 150 \ 45 \ 168]$$

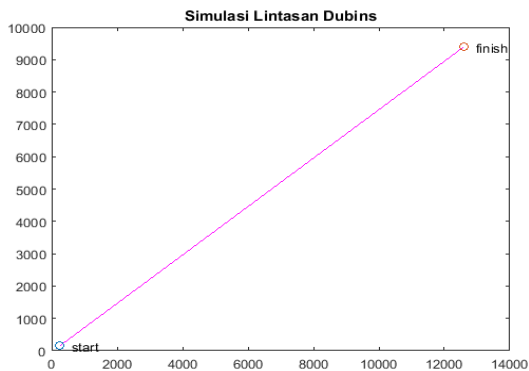
$$p_f = [12600 \ 9400 \ 30 \ 168]$$

dengan menggunakan algoritma lintasan dubins diperoleh panjang masing-masing jenis lintasan Dubins pada Tabel 4.5.

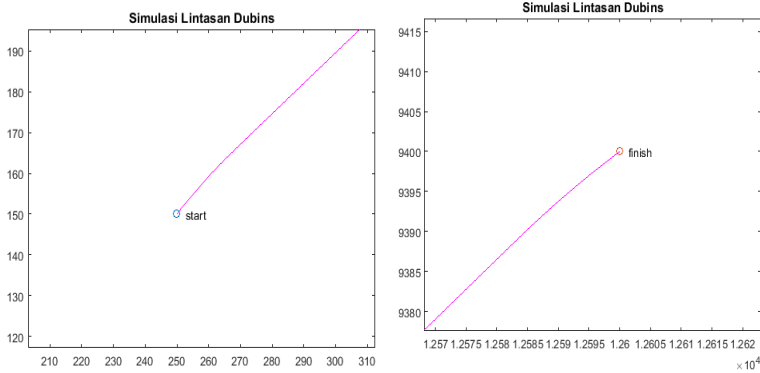
Tabel 4.5: Tabel Panjang lintasan Dubins

jenis lintasan	Panjang lintasan (m)
RSR	15430
RSL	16486
LSR	16533
LSL	17541

Berdasarkan tabel Tabel 4.5 diperoleh lintasan terpendek yaitu lintasan RSR dengan panjang 15430 m yang dianggap sebagai lintasan optimal. Adapun bentuk lintasan diberikan



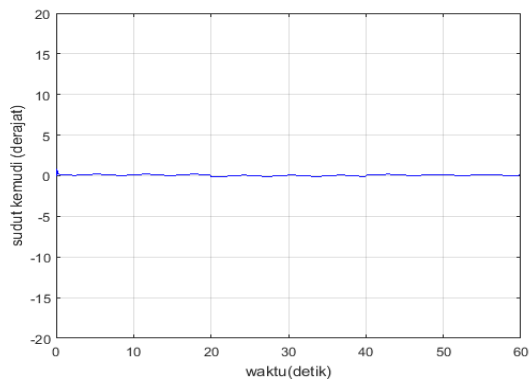
Gambar 4.11: Lintasan Dubins jenis LSR



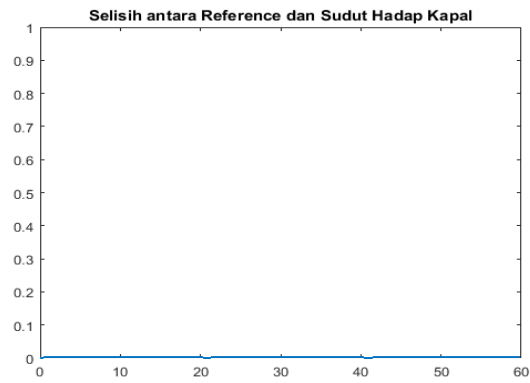
Gambar 4.12: Perbesaran Gambar Lintasan Dubins pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan) Lintasan

pada Gambar 4.11. Jari-jari putar minimum kapal bernilai kecil jika dibandingkan dengan panjang lintasan sehingga kurang terlihat bentuk lintasan di awal. Oleh karena itu dilakukan perbesaran gambar pada posisi awal dan akhir yang ditunjukkan pada Gambar 4.12. Pada gambar tersebut terlihat bahwa lintasan dimulai dengan berbelok ke kanan searah jarum jam(R) kemudian membentuk garis lurus(S) dan berbelok ke kanan searah jarum jam(R) sehingga diperoleh lintasan RSR.

Hasil uji simulasi untuk nilai horizon prediksi $N_p = 100$ menunjukkan bahwa sudut kemudi diberikan seperti pada Gambar 4.13. Pada Gambar 4.13 terlihat bahwa nilai sudut kemudi u bernilai mendekati 0 yang merepresentasikan kapal bergerak lurus dan pada beberapa nilai akhir sudut kemudi u bernilai negatif yang menunjukkan bahwa kapal berbelok ke kanan. Berdasarkan nilai sudut kemudi diperoleh bahwa kapal bergerak lurus kemudian berbelok ke kanan sesuai dengan referensi lintasan Dubins RSL.



Gambar 4.13: Hasil kendali sudut kemudi kapal pada Lintasan Dubins RSL



Gambar 4.14: Hasil Selisih antara Reference dan sudut hadap kapal

Berdasarkan Gambar 4.14 terlihat bahwa selisih antara nilai reference perubahan sudut hadap kapal dan perubahan sudut hadap kapal hasil kendali bernilai kecil atau dapat dikatakan hampir sama.

Simulasi 4

Lintasan yang kedua menggunakan posisi awal dan akhir kapal yang didefinisikan sebagai berikut:

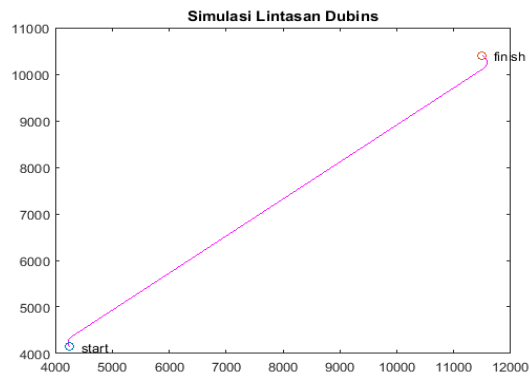
$$\begin{aligned} p_s &= [4250 \ 4150 \ 120 \ 168] \\ p_f &= [11500 \ 10400 \ 150 \ 168] \end{aligned}$$

dengan menggunakan algoritma lintasan dubins diperoleh panjang masing-masing jenis lintasan Dubins pada Tabel 4.6.

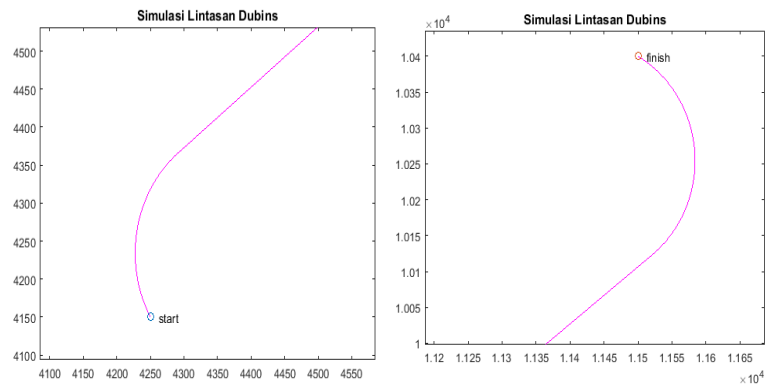
Tabel 4.6: Tabel Panjang lintasan Dubins

jenis lintasan	Panjang lintasan (m)
RSR	10543
RSL	9808.1
LSR	12089
LSL	10722

Berdasarkan tabel Tabel 4.6 diperoleh lintasan terpendek yaitu lintasan RSL dengan panjang 9808.1 m yang dianggap sebagai lintasan optimal. Adapun bentuk lintasan diberikan pada gambar 4.15 . Pada gambar 4.15. Jari-jari putar minimum kapal bernilai kecil jika dibandingkan dengan panjang lintasan sehingga kurang terlihat bentuk lintasan di awal. Oleh karena itu dilakukan perbesaran gambar pada posisi awal dan akhir yang ditunjukkan pada Gambar 4.16. Pada gambar tersebut terlihat bahwa lintasan dimulai



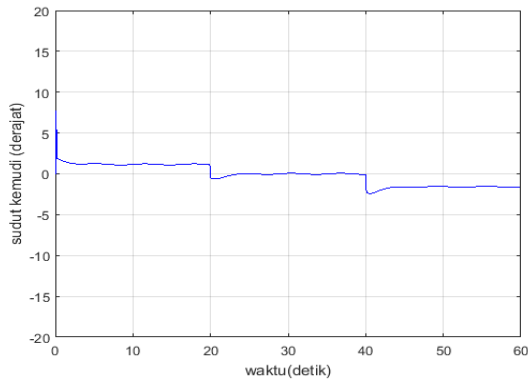
Gambar 4.15: Lintasan Dubins jenis LSL



Gambar 4.16: Perbesaran Gambar Lintasan Dubins pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan) Lintasan

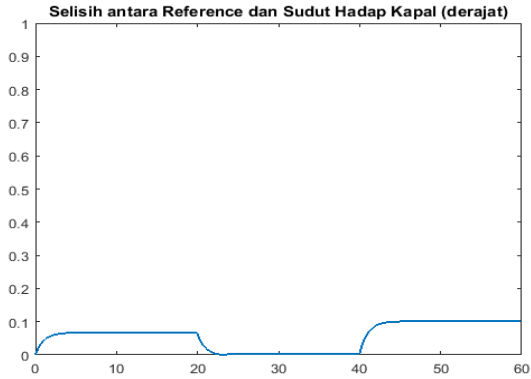
dengan berbelok ke kekanan searah jarum jam(R) kemudian membentuk garis lurus(S) dan berbelok ke kiri berlawanan arah jarum jam(L) sehingga diperoleh lintasan RSL.

Hasil uji simulasi untuk nilai horizon prediksi $N_p = 100$ menunjukkan bahwa sudut kemudi diberikan seperti pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17: Hasil kendali sudut kemudi kapal pada Lintasan Dubins RSL

Pada Gambar 4.17 terlihat bahwa nilai sudut kemudi u bernilai mendekati 0 yang merepresentasikan kapal bergerak lurus dan pada beberapa nilai akhir sudut kemudi u bernilai negatif yang menunjukkan bahwa kapal berbelok ke kiri. Berdasarkan nilai sudut kemudi diperoleh bahwa kapal bergerak lurus kemudian berbelok ke kiri sesuai dengan referensi lintasan Dubins RSL. Berdasarkan Gambar 4.18 terlihat bahwa selisih antara nilai reference perubahan sudut hadap kapal dan perubahan sudut hadap kapal hasil kendali bernilai kecil atau dapat dikatakan hampir sama namun pada beberapa titik di awal dan titik akhir terdapat selisih yang cukup besar karena adanya pengaruh *tracking* lintasan.



Gambar 4.18: Hasil Selisih antara Reference dan sudut hadap kapal

Pengaruh Nilai Horizon Prediksi pada Jenis Lintasan yang Sama

Untuk mengetahui pengaruh nilai horizon prediksi terhadap hasil pengendalian DC-MPC dilakukan uji simulasi dengan nilai horizon prediksi yang berbeda yaitu 90, 100 , 110 dan 120. Setiap nilai horizon prediksi disimulasikan dengan jenis lintasan yang sama yaitu lintasan dengan posisi awal dan akhir kapal didefinisikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} p_s &= [250 \quad 150 \quad 45 \quad 168] \\ p_f &= [12600 \quad 9400 \quad 30 \quad 168] \end{aligned}$$

yang menghasilkan bentuk dan panjang lintasan seperti pada Simulasi 3 sebelumnya. Parameter-parameter yang lain bernilai tetap. Simulasi dilakukan selama 60 detik dengan

waktu sampling 0,1 detik. Untuk mengetahui pengaruh perubahan nilai N_p maka dihitung nilai Root-Mean-Square-Error(RMSE) dan waktu komputasi masing-masing nilai N_p . Hasilnya diberikan pada Tabel 4.7 yang menunjukkan

Tabel 4.7: Tabel RMSE

No	N_p	RMSE	Waktu Komputasi
1	90	0.002990459033343	45.364124
2	100	0.003225243957415	47.992670
3	110	0.003383128571018	49.820512
4	120	0.003450602985636	64.978871

Dari tabel 4.7 terjadi perbedaan nilai RMSE $N_p = 90$, $N_p = 100$, $N_p = 110$ dan $N_p = 120$. Jika dilihat dari besar kecil nilai RMSE maka pada penelitian ini $N_p = 90$ lebih baik dibanding tiga nilai N_p yang lain.

"Halaman ini sengaja dikosongkan."

BAB V

PENUTUP

Pada bab ini, diberikan kesimpulan yang diperoleh dari analisis kendali sudut kemudi pada kapal untuk pelacakan lintasan Dubins dengan menggunakan metode Distrubance Compesating-Model Predictive Control (DC-MPC) beserta simulasinya. Selain itu diberikan saran atau rekomendasi untuk penelitian selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan pada bab sebelumnya, kesimpulan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Kendali dengan menggunakan metode Distrubance Compesating-Model Predictive Control (DC-MPC) dapat diterapkan dengan baik pada kendali sudut kemudi kapal perang covert kelas sigma untuk pelacakan lintasan Dubins. Hal tersebut dapat dilihat dari simulasi kendali pada keempat jenis lintasan yang menghasilkan nilai sudut kemudi.
2. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada penelitian ini yang menggunakan koefisien bobot $Q = 300$ dan $R = 1$, nilai $N_p = 90$ lebih baik dibandingkan dengan nilai $N_p = 100$, $N_p = 110$ dan $N_p = 120$ jika dilihat dari besar kecil nilai RMSE masing-masing N_p .

5.2 Saran

Saran dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pada tugas akhir ini, penulis hanya menggunakan gangguan gelombang air laut , sehingga untuk penelitian selanjutnya bisa ditambahkan gangguan jenis lain yang lebih mendekati perilaku real kapal seperti arus air, angin.
2. Dalam penelitian ini, pengendalian dilakukan dengan mempertimbangkan dua derajat kebebasan yaitu sway dan yaw, sehingga pada penelitian selanjutnya dapat menambahkan jumlah derajat kebebasan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/id.html> accessed 11/06/.
- [2] Fossen, T.I., 1994, **Guidance and Control of Ocean Vehicles**, Hoboken :Wiley.
- [3] Fossen, Thor.I. 2011. **Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control**. John Willy dan Son, Ltd.
- [4] Li, Z and Sun, J, **Disturbance Compensating Model Predictive Control With Application to Ship Heading Control** . IEEE Transaction On Control System Technology, Vol. 20, No.1, Hal 257-267. 2012.
- [5] Tsourdos, A., White, B., and Shanmugavel, M. (2011). **Cooperative Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles**. WILEY.
- [6] Mu'alifah, N., Herisman, I., dan Subchan (2013). **Perencanaan Lintasan Dubins-Geometri pada Kapal Tanpa Awak untuk Menghindari Halangan Statis**. JURNAL SAINS DAN SENI Vol. 1, No. 1, halaman:1-6
- [7] Sorbo, H. E. (2013). **Vehicle Collision Avoidance System**. Thesis Department of Engineering Cybernetics. Norwegian: NTNU..

- [8] Sari Cahyaningtias (2014) **Penerapan Disturbance Compensating Model Predictive Control (DC-MPC) Pada Kendali Gerak Kapal** .JURNAL SAINS DAN SENI, hal:1-7.
- [9] Dian Kusuma Rahma Putri (2016) **Kendali Sudut Kemudi pada Mobil untuk Pelacakan Lintasan Dubins dengan menggunakan Model Predictive Control** . Tugas Akhir hal 1-70.
- [10] Subiono. (2013). **Sistem Linear**. Jurusan Matematika Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Sukolilo, Surabaya, Indonesia.
- [11] Syaifudin, W.H., 2013, **Penerapan Metode MPC pada Kendali Haluan Kapal** , Tugas Akhir Jurusan Matematika ITS, Surabaya
- [12] Ogata, K. (1995). **Discrete-Time Control System:Second Edition**. Prentice-Hall, Inc:New Jersey

LAMPIRAN

"Halaman ini sengaja dikosongkan."

LAMPIRAN A

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Bayu Angga Riyanto, lahir di Sidorejo, 22 April 1995. Penyusun merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Subiran dan Ibu Arlinah. Jenjang pendidikan formal yang ditempuh oleh penyusun dimulai dari SDN Sidorejo 1 (2001-2007), SMPN 1 Bangunrejo (2007-2010), SMAN 1 Bangunrejo (2010-2013). Setelah lulus dari penyusun melanjutkan studi ke jenjang S1 di Jurusan Matematika ITS pada tahun 2013-sekarang melalui jalur SBMPTN dengan NRP 1213100069. Di Jurusan Matematika ITS penulis mengambil Bidang Minat Matematika Terapan. Selain aktif kuliah, penyusun juga aktif berorganisasi di Himpunan Mahasiswa sebagai Staff HIMATIKA ITS (2014/2015), Staff BEM FMIPA ITS (2014/2015), Staff Kaderisasi Ibnu Muqhlah (2014/2015), Ketua BEM FMIPA ITS (2015/2016) dan mengikuti beberapa kepanitian yang ada di dalam kampus.

Adapun informasi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini dapat ditujukan ke penulis melalui email bayuanggariyanto@gmail.com